



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# BALANCE DE CO<sub>2</sub> ASOCIADA A LA BIORRECEPTIVIDAD DE DIFERENTES MORTEROS

Trabajo realizado por:  
**Albert Cruz Biel**

Dirigido por:  
**Ignacio Segura Pérez**  
**Celia Varga Fernández**

Máster en:  
**Ingeniería estructural y construcción**

Barcelona, **Junio 2018**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a los doctores Ignacio Seguro, Celia Varga, Sandra Manso y Ana Blanco por haber sido mis tutores a lo largo este trabajo. Muchas gracias por la paciencia y dedicación que me han dedicado, y por enseñarme a realizar un documento científico de estas dimensiones.

En segundo lugar, quisiera agradecer todo el trabajo y esfuerzo realizados por el equipo de Escofet 1886 S.A al ayudarme con todo el proceso de fabricación de las probetas y a todo el personal del laboratorio de estructuras de la escuela de caminos. En especial agradecer a Tomas, Robert y Jordi por la ayuda prestada en todo el proceso de montaje de los bastidores y por la preocupación mostrada a lo largo de la tesis.

Agradecer también al profesor Rolando Chacón y a Oriol Teixidó por toda la ayuda prestada con el uso del microprocesador Arduino Yún y el sensor de gas y, a la profesora Meritxell Vilaseca de la facultad de Óptica de la UPC por facilitarme el acceso a uno de sus equipos para realizar los ensayos.

Mis agradecimientos a todos los amigos que me han dado su apoyo en aquellos momentos de dificultad en el trabajo. Gracias, Maria G., Roger y Javi y, en especial a David Brun y Montse Prades, gracias por esas magníficas horas que hemos pasado juntos en la biblioteca de Vilassar de Dalt. Gracias Cristina por todos la ayuda, por los ánimos en esos momentos de más dificultad, no tengo palabras para agradecer todo aquello que has hecho por mí a lo largo de este trabajo. También agradecer la comprensión y apoyo de mis compañeros de trabajo, gracias Ariadna, Sergi, Vivi, Eva y Josep.

Por último, muchas gracias a mi familia, padres, hermana y abuelos, por el apoyo moral y económico recibido y por intentar siempre ser optimistas y ver el lado bueno de las cosas en momentos de frustración. A todos ellos, toda mi gratitud.

## Resumen

Actualmente las emisiones de dióxido de carbono que emitimos a la atmósfera son un problema a nivel global. Desde la antigüedad hemos emitido este gas, pero no fue hasta mediados del siglo XX que las emisiones de CO<sub>2</sub> empezaron a ser un problema real. Esta problemática ha hecho que distintas organizaciones hayan realizado convenciones para reducir las emisiones, haciendo que muchos países llegaran a acuerdos para reducirlas.

En las últimas décadas, han sido muchas las investigaciones realizadas en multitud de campos para obtener productos o metodologías que favorezcan la disminución de emisiones de este gas. En el campo concreto de la ingeniería civil, se han desarrollado metodologías para generar áreas verdes en los tejados y en las paredes de los edificios.

La mayor parte de estas metodologías consisten en la integración de un sustrato con plantas autóctonas en la superficie deseada. Los problemas de estas metodologías de generación de superficies vegetadas son los siguientes: precio, aumento de las cargas muertas y posibles fallos en la impermeabilización de la estructura, pudiendo generar filtraciones de agua no deseadas en elementos estructurales.

Otras metodologías consisten en el crecimiento biológico directo en el hormigón. En esta tesis se ha investigado una de estas metodologías de crecimiento directo y se ha hecho un estudio de absorción de CO<sub>2</sub> de las muestras colonizadas. Por ello, se ha desarrollado una serie de muestras con dosificaciones distintas que se han caracterizado.

Posteriormente, se ha analizado la biorreceptividad de cada uno de los materiales e implementado el ensayo de crecimiento acelerado de algas en las distintas probetas de distintas dosificaciones. Una vez implementado el ensayo, se han ido realizando semanalmente ensayos para ver la evolución del crecimiento de algas. Finalmente se ha medido la absorción de CO<sub>2</sub> generadas por las algas que han colonizado esas probetas mediante sensores compatibles con Arduino.



## Abstract

Currently, the emissions of carbon dioxide that we emit into the atmosphere are a global problem. Since ancient times we have issued this gas, but it was not until the mid-twentieth century that CO<sub>2</sub> emissions began to be a real problem. This problem has caused the celebration of various conventions to reduce emissions, causing many countries to reach agreements to reduce them.

In the last decades, there have been many investigations carried out in many fields to obtain products or methodologies that favour the reduction of emissions of this gas. In the specific field of civil engineering, methodologies have been developed to generate green areas on the roofs and on the walls of buildings.

Most of these methodologies consist of the integration of a substrate with native plants on the desired surface. The problems of these methodologies of generation of vegetated surfaces are the following: high price, increase of dead loads and possible failures in the waterproofing of the structure, being able to generate unwanted water leaks in structural elements.

Other methodologies consist of direct biological growth in concrete. In this thesis one of these direct growth methodologies has been investigated and a study of CO<sub>2</sub> absorption of the colonized samples has been made. Therefore, a series of samples has been developed with different dosages that have been characterized.

Subsequently, the bioreceptivity of each of the materials was analyzed and the accelerated run-off test was implemented in the different samples of different dosages. Once the trial has been implemented, weekly trials have been conducted to see the evolution of algae growth. Finally, the absorption of CO<sub>2</sub> generated by the algae that have colonized these specimens has been measured by Arduino and gas sensors



## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	i
Resumen .....	ii
Abstract.....	iii
Índice de tablas .....	ix
Índice de figuras .....	xi
Símbolos .....	xv
Abreviaciones.....	xvii
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. RAZON DE SER.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	6
1.3.1. Objetivos generales .....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. METODOLOGÍA.....	7
<b>CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>9</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	9
2.2. CUBIERTAS VEGETADAS.....	10
2.2.1. Origen.....	10
2.2.2. Cubiertas vegetadas.....	11
2.2.3. Fachadas vegetadas .....	13
2.2.4. Ventajas .....	16
2.2.5. Inconvenientes .....	18
2.3. CRECIMIENTO BIOLÓGICO DIRECTO EN HORMIGÓN.....	19
2.4. HORMIGONES DE FOSFATO DE MAGNESIO .....	21
2.4.1. Revisión histórica .....	21
2.4.2. Usos actuales .....	23
2.5. PARAMETRIZACIÓN DE NIVELES DE CO <sub>2</sub> .....	23
2.5.1. Microcontroladores Arduino.....	24
2.5.2. Mediciones de CO <sub>2</sub> mediante Arduino.....	24

<b>CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....</b>	<b>27</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	27
3.2. PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL.....	28
3.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.3.1. Materiales y dosificaciones.....	29
3.3.2. Proceso de fabricación .....	32
3.3.3. Ensayo de consistencia.....	33
3.3.4. Ensayo de resistencia a compresión .....	35
3.3.5. Ensayo de rugosidad .....	36
3.3.6. Ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio .....	38
3.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	39
3.4.1. Ensayo de consistencia.....	39
3.4.2. Ensayo de resistencia a compresión .....	40
3.4.3. Ensayo de rugosidad .....	43
3.4.4. Ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio .....	43
3.5. CONCLUSIONES.....	44
<b>CAPÍTULO 4: CAMPAÑA DE CRECIMIENTO BIOLÓGICO.....</b>	<b>47</b>
4.1. INTRODUCCIÓN.....	47
4.2. PLANTEAMIENTO DEL ENSAYO.....	48
4.3. METODOLOGÍA.....	48
4.3.1. Bastidores.....	49
4.3.2. Ensayo acelerado de algas .....	50
4.3.3. Ensayo de colorimetría .....	54
4.3.4. Análisis de imágenes .....	55
4.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	56
4.4.1. Ensayo acelerado de algas .....	57
4.4.2. Ensayo de colorimetría .....	59
4.4.3. Análisis de imágenes .....	62
4.5. CONCLUSIONES.....	65
<b>CAPÍTULO 5: CAMPAÑA DE ABSORCIÓN DE CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>67</b>
5.1. INTRODUCCIÓN.....	67
5.2. PLANTEAMIENTO DEL ENSAYO.....	68
5.3. METODOLOGÍA.....	69
5.3.1. PROGRAMACIÓN DEL SENSOR.....	69

5.3.2. CALIBRACIÓN DEL SENSOR.....	72
5.3.3. ESAYO DE ABSORCIÓN.....	73
5.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	74
5.4.1. CALIBRACIÓN DEL SENSOR.....	74
5.4.2. CALIBRACIÓN EN VACÍO.....	75
5.4.3. CALIBRACIÓN DE LAS MUESTRAS SIN COLONIZACIÓN .....	77
5.4.4. ENSAYO DE ABSORCIÓN DE CO <sub>2</sub> .....	78
5.5. CONCLUSIONES.....	81
CAPÍTULO 6: <b>CONCLUSIONES</b> .....	83
6.1. INTRODUCCIÓN.....	83
6.2. CONCLUSIONES.....	84
6.2.1. CONCLUSIONES GENERALES .....	84
6.2.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.....	84
6.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	85
CAPÍTULO 7: <b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA</b> .....	87



## Índice de tablas

Tabla 2.1.	Diferencias principales entre sistemas de cubiertas vegetadas .....	12
Tabla 2.2.	Tabla comparativa simplificada de los métodos para la formación de fachadas vegetadas, extraída de (Pérez Luque 2010).....	16
Tabla 2.3.	Resumen de los estudios realizados previamente por distintos autores .....	22
Tabla 3.1	Tabla resumen de los morteros usados en la campaña experimental.....	30
Tabla 3.2	Tabla de dosificaciones usadas. ....	31
Tabla 3.3.	Tabla de resultados de consistencia .....	40
Tabla 3.4.	Tabla de resultados de los ensayos de resistencia a compresión.....	41
Tabla 3.5.	Resultados del ensayo de rugosidad.....	43
Tabla 3.6.	Tabla de resultados del análisis de porosimetría por intrusión de mercurio .....	44
Tabla 4.1.	Medio de cultivo tipo BBM .....	49
Tabla 4.2.	Resultados del ensayo de colorimetría .....	60
Tabla 4.3.	Comparación entre resultados de colorimetría en la superficie de exposición y en la de no exposición.....	62
Tabla 4.4.	Resultados análisis de imagen.....	63
Tabla 4.5.	Resultados análisis de imagen para la superficie no expuesta .....	64
Tabla 5.1.	Resultados de la calibración.....	75





## Índice de figuras

Figura 1.1.	Crecimiento biológico en muros de hormigón (UPC Campus Nord) .....	2
Figura 1.2.	a) Evolución de la concentración de CO <sub>2</sub> a lo largo de la vida del planeta tierra b) Evolución de la concentración de CO <sub>2</sub> en los últimos 20 años.....	4
Figura 1.3.	Diagrama del efecto invernadero (Olalla 2013).....	4
Figura 1.4.	Evolución de la temperatura y concentración de CO <sub>2</sub> en el periodo entre el año 1000 y el año 2000 .....	5
Figura 1.5.	a) Barcelona en un día de alta contaminación (Caminal 2017) b) Madrid en un día de alta contaminación (Martínez 2017) c) París en días con bajo y alto nivel de contaminación (Díaz 2016) .....	5
Figura 2.1.	Evolución de las emisiones de CO <sub>2</sub> a lo largo de las últimas décadas .....	10
Figura 2.2.	Cubierta vegetada en finlandia (Rivera de la Rosa 2015). b) Jardines colgantes de Babilonia (Morata 2013) .....	11
Figura 2.3.	Esquema general de una cubierta vegetada (Fundació de la Jardineria i el paisatge 2012).....	12
Figura 2.4.	Esquema de los distintos tipos de fachadas vegetadas.....	13
Figura 2.5.	Fachada vegetada tradicional (Premià de Mar).....	14
Figura 2.6.	Aparcamiento del centro comercial Sihlcity en Zúrich (Gedge 2017; Innovativerigging 2017).....	14
Figura 2.7.	Jardineras perimetrales en el edificio Tarradellas (Barcelona) .....	15
Figura 2.8.	a) Edificio Caixa Fórum, Madrid (Herrscher and Becós 2014). b) Edificio Consorcio, Santiago de Chile (Zuberogitia and Agirre 2011).....	15
Figura 2.9.	Hormigón biológico propuesto por (Ottelé 2011).....	20
Figura 2.10.	Evolución de la apariencia visual de las probetas de MPC expuestas al crecimiento acelerado de algas (Manso Blanco 2014) .....	20
Figura 2.11.	a) Placa de Arduino YÚN. b) Sensor de CO <sub>2</sub> MG811 .....	24
Figura 3.1.	Proceso de mezclado de los materiales .....	32

Figura 3.2.	a) hormigón puesto en los moldes de 4x416 cm, b) hormigón puesto en el molde de 8x8x2 cm .....	33
Figura 3.3.	Esquema del ensayo de consistencia.....	34
Figura 3.4.	a) Mortero antes de realizar el ensayo de consistencia b) mediciones del ensayo de consistencia .....	35
Figura 3.5.	a) Ensayo de resistencia a compresión b) probeta después del ensayo a compresión .....	36
Figura 3.6.	Esquema gráfico del significado de Rq y Ra (Manso Blanco, 2014).....	37
Figura 3.7.	Esquema del ensayo de rugosidad.....	37
Figura 3.8.	Estado de las probetas al llegar a la universidad de Gante. a) OPC ref b) MPC ref c) MPC ADP-PDP d) MPC FA/S e) MPC PC8 f) MPC PDP .....	37
Figura 3.9.	Muestra para ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio .....	39
Figura 3.10.	Evolución de la resistencia a compresión de las probetas.....	42
Figura 4.1.	Esquema del perfil longitudinal de los bastidores.....	49
Figura 4.2.	a) Detalle de las bandejas y del sistema de regado b) imagen general de los bastidores .....	50
Figura 4.3.	a) Erlenmeyer con medio de cultivo b) autoclave.....	52
Figura 4.4.	Erlenmeyer de 2 L con algas .....	52
Figura 4.5.	a) Esquema de la cuadrícula del hemocitómetro b) imagen de la cuadrícula central del hemocitómetro c) imagen de la cuadrícula 1 del hemocitómetro.....	53
Figura 4.6.	Colorímetro CR-200 KONICA MILOTA.....	54
Figura 4.7	Representación gráfica del espacio Lab (Grimaldos, n.d.) .....	55
Figura 4.8.	a) imagen sin tratar b) imagen separada según a* c) análisis de imagen threshold B&W .....	56
Figura 4.9.	Evolución del crecimiento de las microalgas en la superficie de ensayo a lo largo del ensayo.....	57
Figura 4.10.	Evolución del crecimiento de las microalgas en la superficie contraria a la de ensayo .....	58
Figura 4.11.	Gráfica de la evolución del ensayo de colorimetría .....	61
Figura 4.12.	Gráfica de la evolución del ensayo de colorimetría en la superficie no expuesta.....	62
Figura 4.13.	Evolución del % de área colonizada a lo largo del ensayo .....	63

Figura 4.14. Evolución del % de área colonizada a lo largo del ensayo en la superficie no expuesta .....	64
Figura 5.1. Esquema de la conexión del sensor a la placa de Arduino (Naylampmechatronics, n.d.) .....	69
Figura 5.2. Realización de la calibración en la cámara de carbonatación del laboratorio de materiales de la escuela de edificación de la UPC.....	72
Figura 5.3. Desecador dónde se ha realizado el ensayo de absorción .....	74
Figura 5.4. Recta de calibración del sensor .....	75
Figura 5.5. Evolución de CO <sub>2</sub> en el desecador en vacío durante 24 h. ....	76
Figura 5.6. Evolución de CO <sub>2</sub> en el desecador en vacío durante la primera hora.....	77
Figura 5.7. Muestra de ensayo con probeta sin colonizar.....	78
Figura 5.8. Gráfico de los resultados de ensayo de absorción.....	79
Figura 5.9. Ensayo de absorción con luz artificial.....	79
Figura 5.10. Evolución de la concentración de CO <sub>2</sub> de las probetas de con dosificación MCP FA/S en un volumen de 2L .....	80



## Símbolos

$a^*$	Componente de luz verde-roja
$b^*$	Componente de luz azul-amarillo
$\text{CaCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	Cloruro de calcio di-hidratado
$\text{Co}(\text{NO}_3) \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	Nitrato de cobalto hexa-hidratado
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
$\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$	Sulfato de cobre penta-hidratado
$\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$	EDTA (Triplex III)
$\text{FeSO}_4$	Sulfato de hierro
$\text{H}_2\text{SO}_4$	Ácido sulfúrico
$\text{H}_3\text{BO}_3$	Ácido bórico
$\text{K}_2\text{H}_2\text{PO}_4$	Di-hidrogen fosfato de potasio
$\text{K}_2\text{PO}_4$	Fosfato de potasio
$\text{KOH}$	Hidróxido de potasio
$L^*$	Factor de luminosidad
$\text{MgO}$	Óxido de Magnesio
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	Sulfato de magnesio hepta-hidratado
$\text{MnCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	Cloruro de manganeso tetra-hidratado
$\text{MoO}_3$	Óxido de molibdeno tetra-hidratado
$\text{NaCl}$	Cloruro de sodio
$\text{NaNO}_3$	Nitrato de sodio
$\text{O}_2$	Oxígeno
$R_a$	Promedio aritmético del perfil de rugosidad
$R_q$	Media cuadrática del perfil de rugosidad
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	Sulfato de zinc hepta-hidratado
$\Delta a^*$	Diferencia en la componente de luz verde-roja
$\Delta b^*$	Diferencia en la componente de luz azul-amarillo
$\Delta C^*$	Variaciones cromáticas
$\Delta E^*$	Diferencia total de color

$\Delta H^*$	Cambios de matiz
$\Delta L^*$	Diferencia lumínica
$\Phi$	Diámetro

## Abreviaciones

a/c	Relación agua cemento
ADP	Di-hidrogen fosfato de amonio ( <i>Ammonium dihydrogen phosphate</i> )
FA/S	Cenizas volantes ( <i>Flying Ash</i> )
MPC	Cemento de fosfato de magnesio ( <i>Magnesium Phosphate Cement</i> )
OPC	Cemento portland ( <i>Ordinary Portland Cement</i> )
PC8	Óxido de magnesio obtenido como subproducto industrial
PDP	Di-hidrogen fosfato de amonio ( <i>Potassium dihydrogen phosphate</i> )





## **CAPÍTULO 1:**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1. ANTECEDENTES**

Dado su bajo coste, buenas prestaciones y durabilidad, el hormigón es a día de hoy, el material más utilizado en construcción, tanto para edificación como para construcción de elementos estructurales. Su gran uso y versatilidad en construcción, ha provocado que este material se encuentre en todo tipo de lugares, indiferentemente de las condiciones atmosféricas y ambientales que se puedan tener.

En muchas ocasiones, las condiciones atmosféricas o de contorno a la que se ve sometido, provoca que este material sufra un deterioro importante, tanto deterioro físico como por agresión de elementos químicos o por degradación debido a la colonización de elementos biológicos, llamado biodeterioro. Sin embargo, también puede existir la colonización de elementos biológicos sin tener un proceso de degradación.

En 1995, Guillitte, definió la capacidad o potencial que tiene un material para ser colonizado por organismos vivos, sin sufrir ningún tipo de biodeterioro como, biorreceptividad (Guillitte 1995)

En el momento en el que el hormigón está en contacto con el agua, la colonización del material por los microorganismos es mucho más favorable, como ocurre en los canales de riego o en las tuberías de transporte de aguas residuales. Aún sin estar en contacto constante con el agua, puede seguir existiendo la colonización de elementos biológicos. En la Figura 1.1 se observa crecimiento directo en muros de hormigón (UPC, Campus Nord).



**Figura 1.1. Crecimiento biológico en muros de hormigón (UPC Campus Nord)**

Los microorganismos más frecuentes que se observan en la colonización de hormigones son: bacterias, hongos, microalgas e incluso musgos. El crecimiento de microalgas y musgos genera cierto interés, dado que, gracias al proceso de fotosíntesis convierten dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en oxígeno ( $\text{O}_2$ ).

Para reproducir el crecimiento que se da de forma natural de microorganismos en hormigones, se han desarrollado metodologías de crecimiento acelerado y se han propuesto configuraciones de hormigones que facilita el proceso de colonización de estos organismos.

## 1.2. RAZON DE SER

“Homo homini lupus” frase extraída de la obra dramática *“Asinaria”* del comediógrafo latino Plauto (250 – 184 a.C.) y, popularizada por el filósofo inglés del siglo XVII Thomas Hobbes (1588 – 1679) en su obra *“El Leviatán”*. Actualmente, traducimos esta locución latina como “el hombre es el lobo del hombre”. Thomas Hobbes usaba esta frase para referirse a que el estado natural del hombre es la lucha continua contra su prójimo. La historia nos ha mostrado en multitud de ocasiones que, la ambición y la envidia de los hombres provoca enfrentamientos entre ellos.

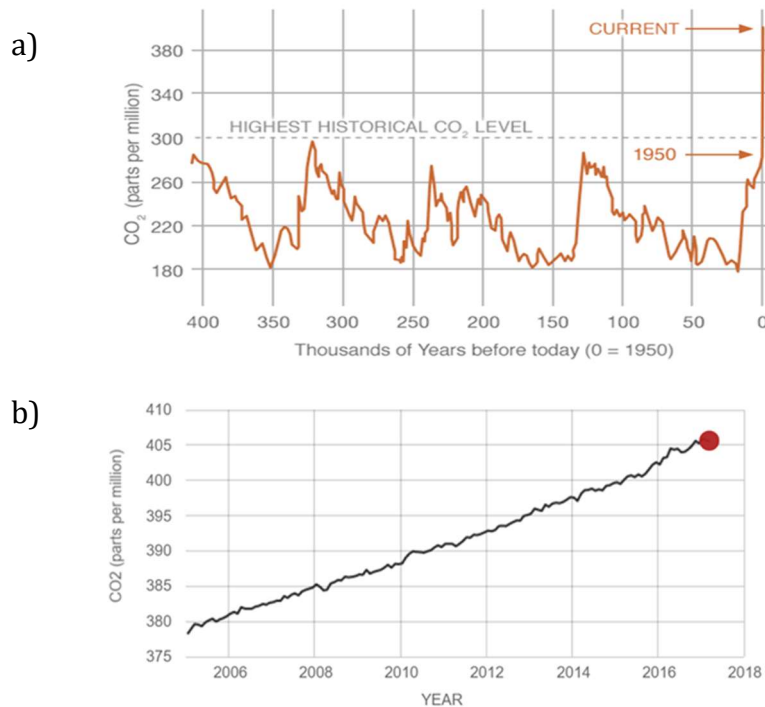
Des del inicio de los tiempos, han existido disputas entre hombres, desde grandes periodos donde distintas civilizaciones, como el del imperio persa o el imperio Romano hasta las guerras actuales. Estas batallas ejemplifican claramente cómo, la avaricia del hombre y su ansia de poder, lo convierte en el depredador más peligroso para sí mismo.

A parte de estas formas de autodestrucción, existen multitud de ejemplos de cómo el hombre es su propio verdugo e incluso el de otras especies. Uno de estos ejemplos, es el de la contaminación ambiental, problema que actualmente, causa miles de muertes al año en países como China o España (Cerrillo 2016; Macauley 2015; OMS 2016; Planelles 2016).

En la Figura 1.2 se muestra la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub>, tanto en la vida del planeta tierra como en los últimos 20 años. Se observa cómo los niveles de CO<sub>2</sub> a lo largo de la vida del planeta han ido variando siguiendo un patrón cíclico. Durante estos ciclos, los valores de concentración tenían un máximo de 300 ppm (partes por millón) en varias ocasiones.

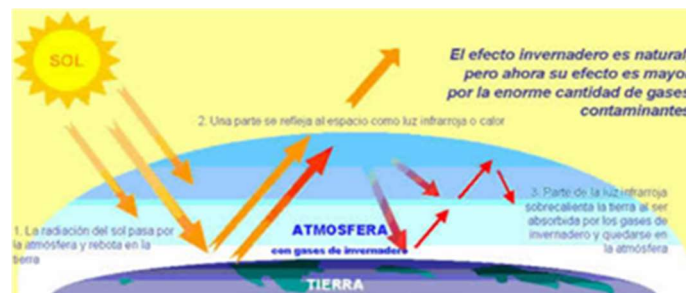
Actualmente, estamos en una fase del ciclo donde la concentración de este gas, debería llegar a valores cercanos a 300 ppm. Este hecho queda patente viendo como en 1950 se sigue la tendencia y se alcanza el que debería ser el pico, pero en el año actual, lejos de disminuir y seguir con la naturaleza del patrón, podemos ver como el nivel de concentración es de 400 ppm.

Según Bob Ward, director de comunicaciones del instituto Grantham de investigación sobre el cambio climático y del medio ambiente en la escuela de Londres de economía y ciencias políticas, no se alcanzaba este valor desde hace 3 millones de años (Carrington 2013).



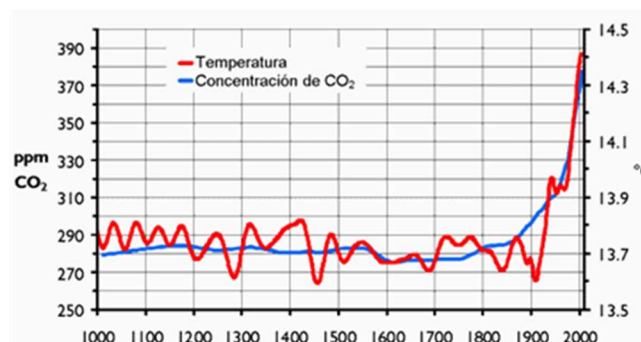
**Figura 1.2. a) Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> a lo largo de la vida del planeta tierra b) Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> en los últimos 20 años.**

Este aumento de la concentración de CO<sub>2</sub>, va estrechamente ligado al aumento de la temperatura del planeta. Este aumento de la temperatura a causa de los gases contaminantes, es el llamado efecto invernadero. Este fenómeno se produce cuando una parte de las radiaciones infrarrojas pasan a través de la atmósfera, pero la mayor parte de éstas es absorbida y re-emitida en lugar de emitirse fuera de la atmósfera. En la Figura 1.3 se muestra un gráfico explicativo del efecto invernadero.



**Figura 1.3. Diagrama del efecto invernadero (Olalla 2013)**

En la Figura 1.4 se observa cómo, claramente existe una relación entre el aumento de la temperatura y el aumento de los niveles de dióxido de carbono. De esta manera, podemos ver cómo, la teoría (efecto invernadero) tiene una correlación con los datos reales de la temperatura en los últimos 1000 años. También se observa como efectivamente, a mediados del siglo XX se llegó a uno de los periodos de máximos de concentración de los ciclos y que, en lugar de descender, empieza a ascender hasta llegar a 390 ppm y 14,4 °C en el año 2000.



**Figura 1.4. Evolución de la temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> en el periodo entre el año 1000 y el año 2000**

Queda visto que el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> es un grave problema que debe mitigarse, tanto para la supervivencia de los seres humanos como del resto de animales y plantas. A día de hoy, ciudades como Barcelona, Madrid o París plantean restricciones de tráfico para los vehículos altamente contaminantes para poder intentar disminuir la contaminación.

En la Figura 1.5, se muestran imágenes de Barcelona (a), Madrid (b) y París (c) en un día de alta contaminación, en la imagen correspondiente a la ciudad de París, se muestra la misma imagen tomada en un día sin contaminación y otra en un día de contaminación, por lo que ver la diferencia generada por la contaminación en el ambiente.



**Figura 1.5. a) Barcelona en un día de alta contaminación (Caminal 2017) b) Madrid en un día de alta contaminación (Martínez 2017) c) París en días con bajo y alto nivel de contaminación (Díaz 2016).**

Debido a los altos niveles de contaminación y que las microalgas, mediante la fotosíntesis son capaces de convertir el CO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub>, se plantea el estudio de la evaluación de la absorción de CO<sub>2</sub> que realizan ciertos morteros colonizados.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivos generales

Los objetivos generales del presente trabajo son tres. El primero de ellos, consiste en poder determinar la biorreceptividad a nivel de geometría que presentan las distintas dosificaciones porosas planteadas en este estudio.

La causa de la diferencia entre biorreceptividades entre materiales, vendrá dada por el material en sí y por las características geométricas de las probetas. Para poder encontrar estas diferencias se estudiarán distintos parámetros y se determinará cuáles de ellos son teóricamente más biorreceptibles.

El segundo de los objetivos generales es, evaluar y determinar cuál de las dosificaciones que se han propuesto en este estudio ha resultado ser realmente más biorreceptible. Para poder valorar cuál ha sido más biorreceptible, se estudiará el crecimiento real en cada una de las probetas mediante ensayos aceptados para ello.

El tercer y último de los objetivos generales de este trabajo, consiste en determinar la absorción de CO<sub>2</sub> de las distintas probetas que han sido colonizadas por las microalgas.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son los siguientes:

- Determinación de la resistencia a compresión de las distintas dosificaciones realizadas.
- Determinar, según los ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio y porosidad, que materiales son más biorreceptibles en cuanto a geometría de las probetas.
- Determinar según el ensayo de colorimetría y el área colonizada, cuáles de las probetas y materiales han tenido mayor colonización.
- Determinación de que horquilla temporal el sensor de CO<sub>2</sub> usado es capaz de realizar mediciones fiables.

- Determinar si las probetas de mortero sin colonización son capaces de absorber CO<sub>2</sub>.
- Determinar la absorción de CO<sub>2</sub> de las distintas probetas colonizadas.

## 1.4. METODOLOGÍA

El trabajo se ha estructurado en seis capítulos. El **Capítulo 1**, el presente, corresponde a la introducción del trabajo, presentación de los antecedentes, la razón de ser del estudio, y se muestran los objetivos propuestos.

En el **Capítulo 2** se presenta una revisión del estado del conocimiento en relación la creación de coberturas vegetadas, viendo que metodologías se usan en la actualidad y cuales otras se han estudiado. También se hace una introducción a los hormigones de fosfato de magnesio y a los microprocesadores Arduino.

En el **Capítulo 3** hace referencia a la caracterización de los materiales que se han usado. En dicho capítulo se exponen la metodología que se usó tanto para la fabricación como para la realización de los ensayos y se exponen los resultados.

En el **Capítulo 4** se explica el proceso que se siguió para la campaña de crecimiento biológico. También se exponen los resultados de los ensayos relacionados con el crecimiento de microalgas mostrados para cada una de las dosificaciones.

En el **Capítulo 5** se explica al detalle y se muestran los resultados del ensayo de absorción, pasando por la programación del microprocesador, el calibrado del sensor, las calibraciones en vacío y el ensayo de absorción con las muestras colonizadas.

En el **Capítulo 6** se explican las conclusiones resultantes de los ensayos tanto de crecimiento como de absorción. También se exponen las futuras actuaciones que se deben realizar para poder empezar a implementar la aplicación de estas metodologías en la obra civil.





## CAPÍTULO 2:

### ESTADO DEL ARTE

#### 2.1. INTRODUCCIÓN

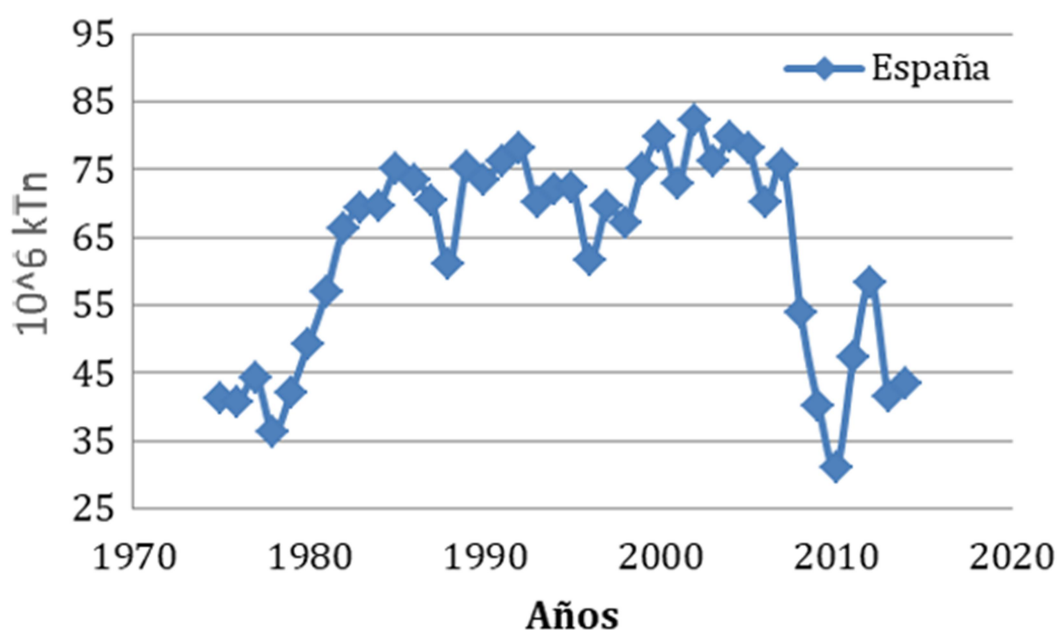
Los restos arqueológicos más antiguos indican que la especie humana *Homo Erectus*, antepasado del *Homo Sapiens*, conocía el fuego hace 1.600.000 años. En sus comienzos, el mayor problema era mantener el fuego, dado que no sabían encenderlo ni mantenerlo. Más adelante, adquirieron el conocimiento para hacer fuego a su voluntad (Montalvo Luna 2013).

El dominio del fuego, le ha permitido al ser humano crear nuevas tecnologías como, por ejemplo, la máquina de vapor. Con el avance de la tecnología mediante el fuego, la civilización ha podido evolucionar, aunque a costa de emitir gases provenientes de la combustión a la atmósfera.

Dichos gases son principalmente los óxidos de carbono, el dióxido de azufre, el metano y el ozono. Todos ellos, favorecedores del cambio climático y el calentamiento global al que está sometido actualmente el planeta.

El aumento de las emisiones de dióxido de carbono, que por su fórmula química abreviamos CO<sub>2</sub>, a lo largo de las últimas décadas, ha generado grandes problemas de contaminación ambiental. En la Figura 2.1, se observa como las emisiones de CO<sub>2</sub> han ido en aumento desde mediados de la década de los 80 del pasado siglo.

Durante los años comprendidos entre 2007 y 2010, la emisión de las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyeron considerablemente, este hecho está relacionado con la crisis económica y financiera mundial. Con la recuperación de la economía, las emisiones de CO<sub>2</sub> volvieron a subir.



**Figura 2.1. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> a lo largo de las últimas décadas**

Este capítulo se dividirá en tres partes, en la primera parte se hablará de las superficies vegetadas. Comentando el origen, las metodologías actuales y las ventajas e inconvenientes de dichas metodologías. También se expondrá la vía de actuación que seguirá el presente estudio.

La segunda parte de este capítulo trata de los hormigones de fosfato de magnesio, del inglés *Magnesium Phosphate Cement* (MPC), haciendo una breve revisión histórica y comentando los usos actuales de dichos hormigones. Por último, en la tercera parte del capítulo se hablará de cómo obtener datos mediante sensores.

## 2.2. CUBIERTAS VEGETADAS

### 2.2.1. Origen

Las cubiertas vegetales y las fachadas vegetadas, son conocidas y usadas desde hace siglos. Mientras unas fuentes aseguran que su uso proviene de los

países escandinavos (Noruega, Suecia y Dinamarca), otras fuentes aseguran que se remonta a los años 4000 A.C, siendo los jardines colgantes de Babilonia el primer ejemplo de ellos (Rivera de la Rosa 2015)

En la Figura 2.2 se muestran unas imágenes correspondientes a una cubierta vegetada en Finlandia y una recreación de cómo se piensa que fueron los jardines colgantes de Babilonia.



**Figura 2.2. Cubierta vegetada en finlandia (Rivera de la Rosa 2015). b) Jardines colgantes de Babilonia (Morata 2013)**

El uso de jardines y coberturas vegetales se ha dado tanto en climas fríos como en cálidos. En las zonas más cálidas, estas coberturas tienen un efecto de enfriamiento dado que mantienen aislados los espacios interiores de las altas temperaturas del interior. Sin embargo, en los climas fríos, estas coberturas son capaces de almacenar el calor de los ambientes interiores, manteniendo el calor (Minke 1992).

Debido a las altas cantidades de superficies de asfalto y hormigón y al creciente volumen de tráfico vehicular, los automóviles, calefacciones y fábricas consumen gran parte del oxígeno produciendo gases nocivos, aparte de favorecer el calentamiento global.

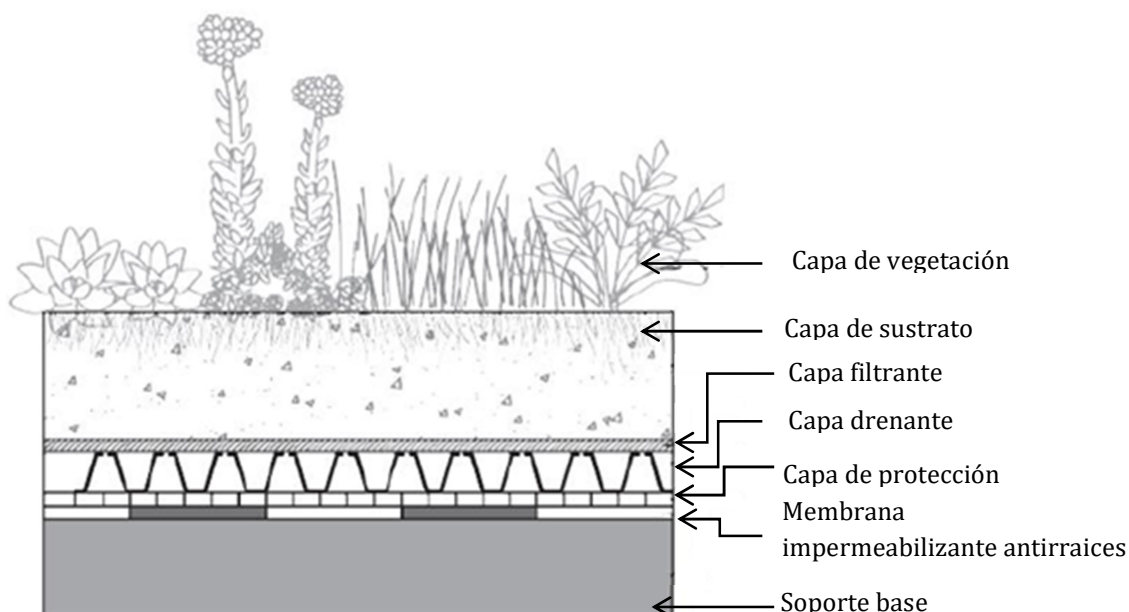
Las fachadas vegetadas y las cubiertas vegetadas, podrían mejorar el ambiente contaminado de las ciudades, purificando gran parte del aire y, además, ayudaría a reducir considerablemente los remolinos de polvo y las variaciones de temperatura.

### **2.2.2. Cubiertas vegetadas**

Actualmente, las cubiertas vegetadas se pueden dividir en tres tipologías en función de los usos a que serán destinadas, la profundidad del medio de cultivo, la vegetación y de los requisitos o grado de mantenimiento requerido. Dichas categorías son: cubiertas vegetales extensivas, cubiertas vegetales semiintensivas y cubiertas vegetales intensivas.

Estas tres tipologías siguen un esquema general que se muestra en la Figura 2.3. En dicha figura se observan las diferentes capas que componen el sistema de cubierta vegetada y que son necesarias para mantener la seguridad estructural de

la cubierta, tanto por las posibles filtraciones de agua como por el daño que pueden generar a raíces.



**Figura 2.3. Esquema general de una cubierta vegetada (Fundació de la Jardineria i el paisatge 2012)**

Una vez visto el esquema general que presentan las tres tipologías, en la Tabla 2.1 se muestran las diferencias que provocan la distinción entre ellas. Se observa que dichas diferencias residen principalmente en: la profundidad del sustrato, el uso que se le da a la cubierta y el precio, tanto de ejecución como de mantenimiento (CYPE Ingenieros 2017).

**Tabla 2.1. Diferencias principales entre sistemas de cubiertas vegetadas**

	<b>Cubiertas vegetadas</b>		
	<b>Extensivas</b>	<b>Semiintensivas</b>	<b>Intensivas</b>
<b>Profundidad del sustrato</b>	7 cm	10 – 25 cm	< 60 cm
<b>Uso</b>	No Transitable	Transitable	Transitable
<b>Mantenimiento</b>	40€/m2 anual	90€/m2 anual	110€/m2 anual
<b>Precio</b>	70 €/m <sup>2</sup>	110 €/m <sup>2</sup>	150 €/m <sup>2</sup>

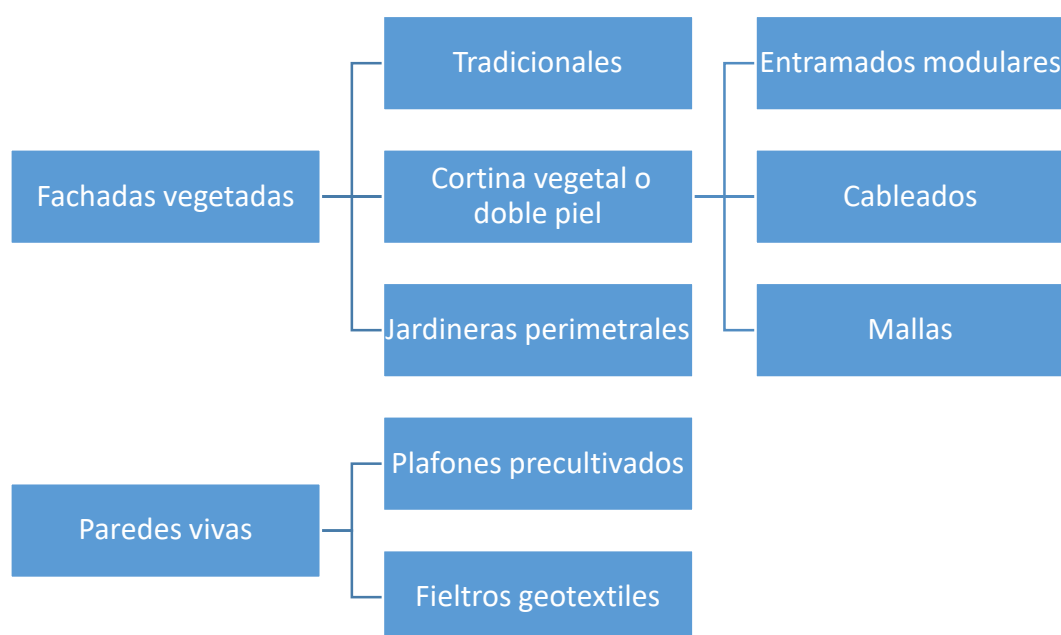
De esta tabla se extrae que el precio de instalación de una cubierta semiintensiva es un 50% más caro que el de una cubierta extensiva, mientras que el precio de una cubierta intensiva es más un 220% más cara. En cuanto a mantenimiento se refiere, el porcentaje a pagar en una cubierta vegetada semiintensiva respecto de una extensiva es de 225%, mientras que el de una cubierta intensiva respecto a una intensiva es de un 270%.

### 2.2.3. Fachadas vegetadas

Actualmente existe una gran variedad de sistemas de fachadas vegetadas. Entre todos ellos, cabe diferenciar dos grupos principales: las fachadas vegetadas y las paredes vivas. Las fachadas vegetadas son sistemas en los que plantas trepadoras se desarrollan hasta lograr cubrir toda la superficie deseada. Dichas plantas pueden estar plantadas en el suelo de la base de la estructura o, pueden estar en macetas a diferentes alturas de la fachada.

Por otra parte, las paredes vivas, están formadas por plafones y geotextiles que se adhieren a la fachada del edificio. En el caso de los plafones, muchas veces consisten en macetas de acero inoxidable, polietileno de alta densidad o chapa galvanizada de acero en los que se deposita el sustrato y se cultivan las plantas. Una vez se han cultivado a parte las plantas, se realiza la pared viva con esos plafones (Azkorra Larrinaga 2015).

En la Figura 2.4, se muestra un esquema en el que se resumen los distintos tipos de fachadas vegetadas que encontramos hoy en día (Azkorra Larrinaga 2015; Rivera de la Rosa 2015). Los métodos expuestos en el esquema, se desarrollarán y se explicarán con más detalle a continuación.



**Figura 2.4. Esquema de los distintos tipos de fachadas vegetadas**

#### 2.2.3.1. Fachadas vegetadas tradicionales

Esta tipología las plantas tipo enredadera o arbusto de porte colgante, soportadas por una ligera estructura metálica, crecen hasta llegar a cubrir la totalidad de la superficie. En la Figura 2.5 se muestra una fachada de este tipo. Se observa como las plantas tipo enredadera son capaces de llegar a cubrir una gran extensión de la superficie total. También se puede apreciar que en este caso en particular, las plantas se sitúan en la cúspide y se desarrollan hacia la base de la estructura.



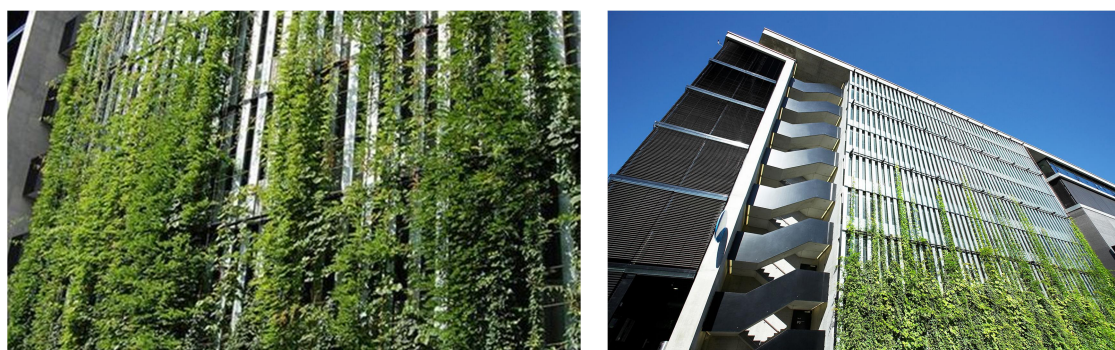


**Figura 2.5. Fachada vegetada tradicional (Premià de Mar)**

### *2.2.3.2. Fachadas de doble piel o cortina vegetal*

Este subgrupo busca la creación de una segunda piel separada de la fachada, dicha separación depende del sistema que se usa. Las estructuras auxiliares que se suelen emplear para la formación de estas fachadas son muy ligeras, normalmente son formadas por: entramados modulares, cableado o mallas. Todas ellas son estructuras muy ligeras.

En la Figura 2.6 se observan diferentes vistas de la fachada formada con el sistema de doble piel o cortina vegetal del aparcamiento del centro comercial SihlCity, en Zúrich. En esta fachada, la estructura auxiliar está formada por una malla de láminas de acero, por esta estructura crecen las plantas tipo enredadera cubriendo gran parte de la superficie.



**Figura 2.6. Aparcamiento del centro comercial sihlcity en Zúrich (Gedge 2017; Innovativerigging 2017)**

### *2.2.3.3. Jardineras perimetrales*

Esta tipología, genera la superficie vegetada a partir de unas jardineras situadas en los contornos perimetrales. En ellas, se plantan arbustos de puerto colgante, que acaban formando una cortina verde en la fachada. En la Figura 2.7 se muestra la jardinera perimetral del edificio Tarradellas, en Barcelona. En esta fachada las plantas nacen en la parte superior del muro de los balcones y descenden, cubriendo así gran parte de la superficie (Pérez Luque 2010).

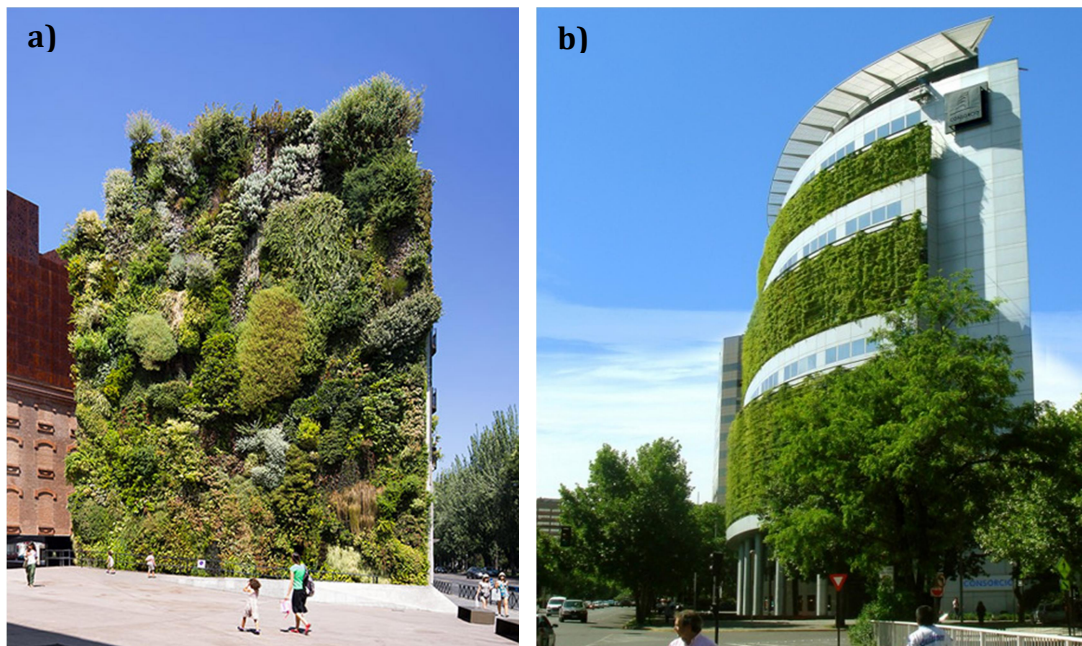


**Figura 2.7. Jardineras perimetrales en el edificio Tarradellas (Barcelona)**

#### *2.2.3.4. Paredes vivas*

Las paredes vivas están formadas por plafones precultivados de acero inoxidable, polietileno de alta densidad o chapa galvanizada de acero o geotextiles. En el caso de los plafones precultivados, el sustrato se deposita en los plafones y se cultivan las plantas en ellos, en el caso de los geotextiles, estos sirven de soporte para el crecimiento y se anclan a la estructura (Pérez Luque 2010).

En la Figura 2.8 se muestran la fachada del edificio Caixa Fórum en Madrid y el Edificio Consorcio, en Santiago de Chile. Ambas fachadas realizadas como paredes vivas. El edificio Consorcio es un complejo de oficinas, su cobertura vegetal permite ahorrar un 48% de energía con respecto a edificios de tamaño y características similares (Zuberogoitia and Agirre 2011).



**Figura 2.8. a) Edificio Caixa Fórum, Madrid (Herrscher and Becós 2014). b) Edificio Consorcio, Santiago de Chile (Zuberogoitia and Agirre 2011)**



Cada uno de los distintos sistemas tiene ciertas ventajas e inconvenientes respecto a los otros. En la Tabla 2.2, extraída de la tesis de doctoral de (Pérez Luque 2010) se muestra una comparativa de los métodos para formar fachadas vegetadas.

En la Tabla 2.2 se puede ver que, por lo general, para formar las distintas tipologías se usan plantas tipo enredaderas o arbustos. También se observa que, tanto el precio de inversión como el de mantenimiento, es menor para las fachadas vegetadas que para las paredes vivas.

**Tabla 2.2. Tabla comparativa simplificada de los métodos para la formación de fachadas vegetadas, extraída de (Pérez Luque 2010)**

Sistemas de fachadas vegetales		Especies usadas	Inversión	Daño	Mantenimiento
<b>Fachadas vegetadas</b>	Tradicionales	Enredadera	Baja	Medio	Bajo, extensivo
	Doble piel o cortina	Enredadera	Media	Bajo	Bajo, extensivo
	Jardineras Perimetrales	Arbusto	Media	Bajo	Alto, intensivo
<b>Paredes Vivas</b>	Plafones	Arbusto	Alta	Bajo	Alto, intensivo
	Fieltrós	Arbusto, musgo	Alta	Bajo	Alto, intensivo

#### 2.2.4. Ventajas

El recubrimiento vegetal en los edificios y superficies de hormigón producto de la ingeniería civil, tendrían multitud de ventajas, algunas de estas ventajas tienen una afectación directa al medio ambiente, como por ejemplo, la producción de oxígeno y purificación local del aire.

Otras de las ventajas tienen una afectación indirecta, como el aislamiento. Aunque directamente no tengan un efecto sobre el medioambiente, la producción de energía para aislar los edificios sí que tiene un efecto negativo. En los siguientes apartados se tratan los efectos más relevantes que producen las cubriciones para el medio ambiente

##### 2.2.4.1. Producción de oxígeno y purificación local del aire

Es sabido que las plantas, mediante el proceso de la fotosíntesis, consumen CO<sub>2</sub> y luz para producir su propio alimento y, de esa forma, generan oxígeno. Dicho proceso, se da únicamente durante el día, por la noche, por el contrario, las plantas durante el proceso de respiración, consumen oxígeno para producir dióxido de carbono. Sin embargo, solamente de un 20% a un 33,3% del O<sub>2</sub> producido, se consume nuevamente (Minke 1992).

Las plantas, tienen la capacidad de actuar como filtro del polvo y la suciedad del aire, atrapando las partículas de polvo en la superficie de las hojas. Estas partículas, posteriormente son arrastradas al suelo gracias a la lluvia. A su vez,



como se demostró en las investigaciones llevadas a cabo por (Bartfelder, F. y Köhler 1986) que las plantas pueden absorber partículas nocivas en forma de gases y también metales pesados.

#### *2.2.4.2.Regulación de la temperatura y reducción del remolino de polvo*

Las plantas, mediante la transpiración y la condensación de agua, son capaces de reducir las oscilaciones de temperatura. Durante el día, producen un ciclo de agua que consiste en: absorber agua por las raíces, transportar el agua y los nutrientes por toda la planta y, una vez llegada a las hojas, se produce la evaporación.

Este proceso llamado transpiración, aparte de ser el método de alimentación de la planta, genera un eficiente sistema de refrigeración en la planta (Azcon-Bieto and Ona 2000). Por la noche, se condensa la humedad en la superficie de las plantas formando el rocío matinal y generando una recuperación de calor.

Durante el mes de junio del año 2000 y entre los meses de setiembre de 2010 y enero de 2011, se realizaron en Kassel (Alemania) ensayos dónde se midió la temperatura bajo un sustrato con vegetación. Observaron como la temperatura bajo sustrato vegetal, es menos sensible a la variación de temperatura ambiente. Estos estudios quedan recogidos por (Minke 1992) en la segunda edición de su libro en castellano.

Las corrientes ascendentes generadas por el aumento de temperatura en las superficies, genera que las partículas de suciedad y polvo depositadas sobre las calles, plazas y patios sean impulsadas a la atmósfera, dichas partículas forman una capa de humos y suciedad sobre los ámbitos residenciales. Las superficies vegetadas pueden reducir este movimiento, dado que la temperatura en las zonas verdes no aumenta tanto como en las zonas pavimentadas o de hormigón (Robinette 1972).

#### *2.2.4.3.Efecto de aislamiento*

Las plantas tienen ciertos procesos fisiológicos que les permiten aumentar efectos de aislamiento tanto térmico como acústico. Estos procesos fisiológicos pueden ayudar a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> que se producen al invertir energía para aislar las viviendas. Por lo tanto, de una forma indirecta, la mejora del aislamiento, hace disminuir el CO<sub>2</sub> ambiental.

El mal aislamiento térmico en las viviendas, es un problema que induce a un incremento del gasto energético y económico por parte de los usuarios. Las viviendas con mal aislamiento térmico gastan más electricidad y/o combustibles fósiles para calentar o refrigerar la vivienda, traduciéndose en un incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Las superficies vegetadas pueden generar aislamiento térmico de distintas formas. La que más favorece al aislamiento consiste en la generación de una cámara de aire, cuanto más denso y grueso sea el recubrimiento vegetal, mayor será el efecto aislante.

En cuanto al aislamiento acústico se refiere, las superficies vegetadas proporcionan buenas capacidades de absorción del sonido, aunque su contribución depende del diseño y los materiales que se utiliza en cada sistema de superficie vegetada (Azkorra Larrinaga 2015).

#### *2.2.4.4. Capacidad de retención de agua*

Los desbordamientos y las inundaciones generan considerables daños económicos y medioambientales. Las superficies vegetadas proporcionan una superficie permeable, dando capacidad para retener el agua. Dependiendo del sistema del sistema constructivo y de su drenaje, pueden reducir la carga de agua vertida en el alcantarillado y sistemas de saneamiento (Azkorra Larrinaga 2015; Teemusk and Mander 2009).

Tal y como demostraron (Fioretti et al. 2010), la respuesta hídrica de la superficie vegetada, variará dependiendo de la cantidad de agua contenida en el sustrato en el momento de la lluvia. Es decir, si en el momento de la lluvia, el sustrato contiene agua, su respuesta hídrica será menor que si no tuviese agua (van der Berg et al. 2010).

#### **2.2.5. Inconvenientes**

Una vez vistos los métodos usados para la generación de superficies vegetadas, se encuentran algunos inconvenientes. En primer lugar, se puede observar que, para la aplicación de algunos de los métodos, es necesario la creación de una estructura auxiliar o una base de sustrato, esto implica que se generan sobrecargas importantes.

La generación de sobrecargas tiene como consecuencia la dificultad de aplicación de estas soluciones en estructuras existentes, dado que la mayor parte de las estructuras no tienen en consideración dicha sobrecarga (para cubiertas extensivas, siendo la más ligera de las categorías, la sobrecarga correspondiente es de unos 150 kg/m<sup>2</sup> (Zinco 2015)).

En caso de futuras estructuras donde se prevé la aplicación de estos métodos, el hecho de tener unas grandes sobrecargas debidas a estos jardines acaba generando unas estructuras con mayor cantidad de material. La extracción de los áridos, la fabricación de los componentes del hormigón, el transporte y la propia reacción de fraguado generan mayores emisiones de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, de

una forma directa e indirecta, el hecho de necesitar estructuras más grandes, hacen aumentar la huella de carbono que deja la construcción de esas estructuras.

Otra problemática que existe, es el mantenimiento. La mayoría de las metodologías necesitan un regado y un podado continuo. Esta problemática no tiene una importancia tan clara como la del peso extra generado, dado que se puede dotar de un sistema de riego automático. Aunque dichos sistemas de riego automático, generan problemas de durabilidad en las estructuras.

Tanto el paso de instalaciones de riego, como el riego manual, hace que el sistema necesite un buen aislamiento, en caso de no ser así o que las raíces perforen el aislamiento, el agua puede empezar a filtrarse y a acumularse en el paramento interior del aislamiento. Esto puede provocar que el agua que se vaya infiltrando por las grietas y poros del hormigón, acabe provocando carbonatación en el hormigón y, en caso de llegar a las armaduras, provocando la corrosión del acero.

### 2.3. CRECIMIENTO BIOLÓGICO DIRECTO EN HORMIGÓN

Considerando los problemas de sobrecargas y mantenimiento que se generan en la aplicación de los métodos comentados, se opta por seguir estudiando en la vía del crecimiento directo en el hormigón. De esta forma, se evita la generación de la sobrecarga correspondiente a las capas de sustrato.

El crecimiento biológico directo en el material viene relacionado con el término biorrecpetividad. Este término se define como la facilidad que tiene un material para ser colonizado por organismos vivos. La facilidad que presenta un material para ser colonizado depende de varios parámetros intrínsecos del material, estos parámetros son: la porosidad, la rugosidad, la humedad y la composición química (Guillitte 1995).

En 2011, en su tesis doctoral (Ottelé 2011) planteó la integración de la vegetación directamente en el hormigón. Para ello diseñó un hormigón bicapa, dónde una de las capas tiene una función estructural mientras que la otra es una capa de alta porosidad. Esta capa con alta porosidad, permite la integración de sustrato en el propio hormigón, haciendo posible el cultivo de especies vegetales.

En la Figura 2.9 se muestra el hormigón de dos componentes propuesto por (Ottelé 2011), se observa el aspecto granular y poroso de la capa en la que se realiza el crecimiento biológico. Aunque el nivel de integración de este sistema es mayor que los anteriores, su alto precio (1200 €/m<sup>2</sup>) y la necesidad de incorporar un sustrato para plantar las plantas, muestran que requiere mayor investigación (Manso Blanco 2014; Ottelé 2011).

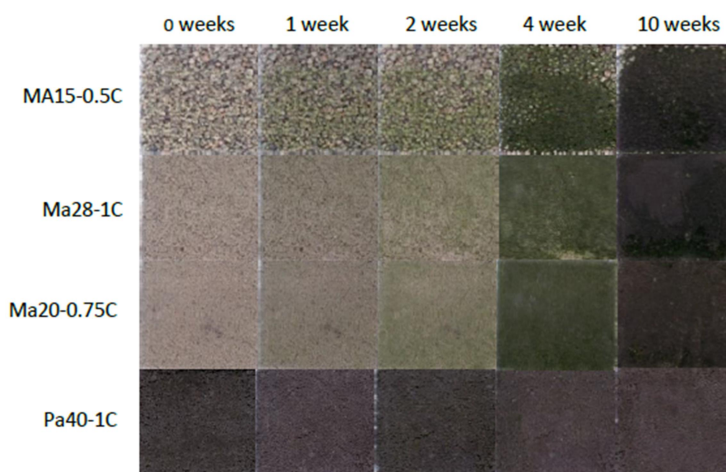


**Figura 2.9. Hormigón biológico propuesto por (Ottelé 2011)**

Con el objetivo de aumentar la integración, reducir costes de implementación y mantenimiento de las coberturas vegetadas, (Manso Blanco 2014) plantea el crecimiento directo mediante microalgas. En su tesis doctoral, (Manso Blanco 2014) aplica el método de crecimiento acelerado de algas desarrollado en la universidad de Gante por (De Muynck et al. 2009), en probetas de hormigón de fosfato de magnesio y portland.

En la Figura 2.10 se muestra la evolución de la colonización de las microalgas, en ella se aprecia que la colonización en muestras de cementos de fosfato de magnesio, que por su nombre en inglés abreviamos como MPC, tienen mayor biorreceptividad que las muestras de cemento portland (Pa40-1C).

Esto es debido a que el alto pH de los hormigones convencionales de portland, que por sus siglas en inglés “Ordinary Portland Cement”, abreviamos como OPC, tienen un bajo potencial para ser colonizadas por las microalgas del tipo *Chlorella vulgaris*. Por el contrario, para este tipo concreto de microalgas, los hormigones de fosfato de magnesio ofrecen más biorreceptividad (Manso Blanco 2014).



**Figura 2.10. Evolución de la apariencia visual de las probetas de MPC expuestas al crecimiento acelerado de algas (Manso Blanco 2014)**

Con ánimo de reducir el regado de las microalgas, en esta tesis se plantea el uso de hormigones porosos. Los poros generan un espacio de almacenamiento que

permite a la planta tener una fuente constante de agua y nutrientes. La ventaja de la porosidad únicamente existe en el rango en que la microalga es capaz de absorber el agua, toda la acumulada más lejos de ese rango, se convierte en filtraciones al interior, convirtiéndose en una desventaja.

En la tesis doctoral de (Manso Blanco 2014) también se realizó un estudio sobre crecimiento biológico natural en el hormigón. Este ensayo se realizó paralelamente en tres emplazamientos, Gante, Barcelona y el Montseny. Se observó como a nivel de bacterias, el crecimiento era similar en las tres localidades. En el caso de los hongos, se daba mayor crecimiento en Barcelona, dado que el ambiente tenía mayor presencia de microorganismos.

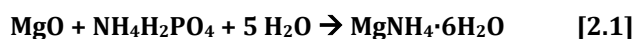
## 2.4. HORMIGONES DE FOSFATO DE MAGNESIO

### 2.4.1. Revisión histórica

Los cementos MPC, son una clase de ligantes cerámicos que se obtienen a partir de una reacción ácido-base en medio acuoso entre un óxido metálico y un fosfato ácido. Fueron descubiertos y desarrollados como cemento dental a finales del siglo XIX. Desde entonces, estos cementos se han ido desarrollando y han tenido varias aplicaciones clínicas. Más tarde, en el año 1937, se empezó a usar como material para fundición de aleaciones (Mestres and Ginebra 2011; Prosen 1939; Wu et al. 2008).

Al principio, debido a la alta solubilidad del ácido fosfórico los MPC eran preparados mezclando dicho ácido con óxidos de magnesio. Dada la agresividad de la reacción y el rápido endurecimiento, que dejaba poco tiempo para su uso en aplicaciones clínicas, se buscaron otras sales de fosfatos como por ejemplo el dihidrogenofosfato de amonio, en inglés Ammonium Dihydrogen Phosphate (ADP).

La reacción principal que se produce al endurecerse la pasta de cemento de fosfato de magnesio basado en el ADP es (Soudée and Péra 2000):



Ya en los años 70 del pasado siglo XX, debido a su alta resistencia inicial, su rápido fraguado y su poca retracción, se empezó a estudiar y usar este material en la ingeniería civil, como material para reparaciones (Liu and Chen 2016; Shijian and Bing 2014).

Durante el proceso de la reacción de endurecimiento de los hormigones de MPC con base de ADP, aparte de ser muy rápida, genera gas amonio, esto hace que su uso quede limitado y no puede ser usado en interiores. Es por estos dos motivos que, a lo largo de los últimos años, se hayan realizado estudios para dar alternativas tanto al tiempo de fraguado, mediante retardantes y a remplazar el ADP por otros fosfatos.

Los fosfatos usados como remplazo del ADP han sido: el dihidrogenofosfato de potasio (PDP por su nombre en inglés, *potassium dihydrogen phosphate*) o el dihidrogenofosfato de sodio (SDP debido a su nombre en inglés *sodium dihydrogen phosphate*) (Mestres and Ginebra 2011).

Los estudios que se han realizados referentes a los retardantes, han contemplado varias alternativa, siendo éstas el trifosfato de sodio, *Sodium triphosphate* en inglés y por ello se abrevia como STP, el ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) y el Borax ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ), aunque el más usado, debido a su efectividad, es el Borax (Jianming and Chunxiang 2010; Liu and Chen 2016; Ltifi, Guefrech, and Mounanga 2011).

Por otro lado, en referencia a la sustitución del ADP por otro fosfato de magnesio, los estudios realizados en los que se ha sustituido el ADP por el PDP muestran que, no solamente se evita la generación de dicho gas, también se pudo observar que generaba una reacción menos exotérmica y aumentaba el tiempo de fraguado, con lo que, dependiendo de la aplicación, puede no ser necesario el uso de retardantes (Qiao, Chau, and Li 2010).

Los hormigones de fosfato de magnesio tienen ciertas ventajas respecto a los hormigones convencionales como, por ejemplo, su rápido fraguado, su alta resistencia inicial o su poca retracción. Estas propiedades hacen que, los MPC tengan un gran potencial para ser usados en la ingeniería civil (Liu and Chen 2016; Yang, Zhu, and Wu 2000; Yue and Bing 2013; Yue, Jia, and Bing 2014).

En la Tabla 2.3 se muestra, a modo de resumen, los estudios existentes en relación a este tipo de material. En ella se muestran únicamente los parámetros más relevantes que pueden condicionar su uso en la ingeniería civil. En dicha tabla se observa que, el parámetro más estudiado, y que generalmente estudian todos los autores, es la resistencia y, por otra parte, el retardante más usado es el Borax.

**Tabla 2.3. Resumen de los estudios realizados previamente por distintos autores**

<b>Autores</b>	<b>Compuesto</b>	<b>Aditivo retardante</b>	<b>Fluidez</b>	<b>Tiempo de fraguado</b>	<b>Calor de hidratación</b>	<b>Resistencia</b>
(Yang, Zhu, and Wu 2000)	MPC	Borax	✗	✓	✗	✓
(Soudée and Péra 2000)	MPC	-	✗	✓	✗	✗
(Buj et al. 2009)	MPC	-	✗	✗	✗	✓
(Jianming and Chunxiang 2010)	MKPC	Borax	✓	✓	✓	✓
(Qiao, Chau, and Li 2010)	ADP, KDP, CV	Borax	✗	✓	✗	✓
(Jianming and Chunxiang 2010)	MKPC	Borax	✓	✓	✓	✓
(Mestres and Ginebra	ADP, NDP	Borax	✗	✓	✓	✓

Balance de  $CO_2$  asociada a la biorreceptividad de diferentes morteros



2011)						
(Yue and Bing 2013)	MPC PDP, CV	Borax	✓	✗	✗	✓
(Shijian and Bing 2014)	CV, STP, DBM	Borax	✗	✓	✓	✓
(Yue, Jia, and Bing 2014)	MPC KDP, CV	Borax	✗	✗	✗	✓
(Gardner et al. 2015)	DBM, CV	Ácido bórico	✗	✓	✗	✓
(Hou et al. 2016)	MPC KDP, NDP	Borax	✗	✓	✗	✓
(Ma and Chen 2016)	MPC KDP	Borax	✗	✗	✗	✓
(Fu et al. 2016)	ADP, DBM	Borax	✓	✗	✗	✓
(Hou et al. 2016)	DBM, KDP	Borax	✗	✓	✗	✓
(Lu and Chen 2016)	MK-MPC, ADP	Borax, Metakaolin	✓	✓	✓	✓
(Park, Kim, and Ann 2016)	MPC PDP	Borax	✗	✓	✗	✓
(Liu and Chen 2016)	MPC ADP, KDP, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Borax	✗	✗	✗	✓

#### 2.4.2. Usos actuales

Actualmente, los hormigones de fosfato de magnesio en la ingeniería civil, tienen un uso más extendido que únicamente para reparaciones de estructuras. Uno de estos usos, es la de estabilización de residuos nucleares (Buj et al. 2009; Gardner et al. 2015).

Otro uso que se le da, es la reparación de pavimentos, la necesidad de reparar un pavimento lo más rápido posible, su rápido endurecimiento hace que, en 15 minutos se pueda reabrir la carretera al tráfico, es por esto que la reparación mediante estos hormigones, sea una solución muy aceptable (Buj et al. 2009; Qiao, Chau, and Li 2010)

### 2.5. PARAMETRIZACIÓN DE NIVELES DE CO<sub>2</sub>

Como se ha comentado, el objetivo principal de este estudio es poder determinar la absorción de CO<sub>2</sub> que generan las diferentes superficies biorreceptivas. Como vía para conocer la absorción, se plantea medir los niveles de CO<sub>2</sub> a lo largo del tiempo y realizar un balance, para ello, se plantea el uso de sensores.

Haciendo una búsqueda de medidores de CO<sub>2</sub>, encontramos que existen dos tipologías, los medidores digitales y los sensores compatibles con microcontroladores. En el caso de los medidores digitales, los datos aparecen en

una pantalla y deben ser anotados manualmente, por el contrario, los microcontroladores nos permiten tener una entrada de datos en un ordenador.

A parte de la ventaja que supone la obtención de datos en un ordenador, el precio de los medidores digitales es mayor al de un sensor y un microcontrolador Arduino. Es por estas dos razones que, para este estudio, se escoge usar un microcontrolador de Arduino y un sensor compatible.

### 2.5.1. Microcontroladores Arduino

Arduino es una plataforma de desarrollo de computación física, de código abierto, basada en una placa con un sencillo microcontrolador y un entorno de desarrollo para crear software (Paniagua 2011)

Un controlador es un dispositivo que se emplea en el gobierno de uno o varios procesos. Un microcontrolador es un circuito integrado en un chip que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador. De forma resumida, podríamos decir que un microcontrolador es un computador sencillo.

Arduino se inició en 2005 como un proyecto educativo en el Instituto IVREA (Italia). El proyecto nació de la necesidad de usar un microcontrolador de bajo coste, ya que en esa época, los estudiantes usaban el microcontrolador BASIC Stamp, que tenía un coste de 100 dólares estadounidenses (Kushner 2011).

Actualmente, existen diversas tipologías de Arduino, desde el Arduino UNO, siendo el más sencillo de todos, hasta el Arduino YÚN, capaz de conectarse a internet, tanto por cable como mediante Wi-Fi. En la Figura 2.11 se muestra una placa de Arduino y un sensor de gas compatible con este microcontrolador.

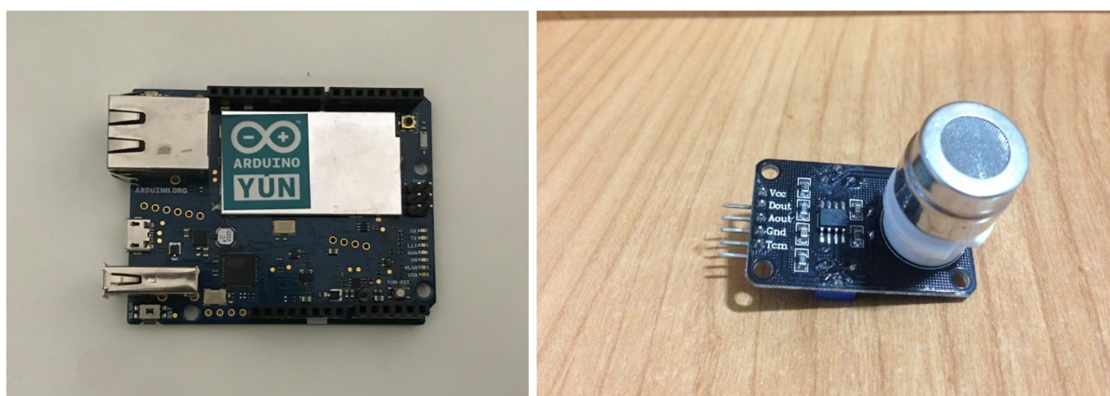


Figura 2.11. a) Placa de Arduino YÚN. b) Sensor de CO<sub>2</sub> MG811

### 2.5.2. Mediciones de CO<sub>2</sub> mediante Arduino

Para medir CO<sub>2</sub> con el microcontrolador Arduino, existen varios sensores compatibles. En primer lugar, existe el sensor MQ-811, un sensor específico de dióxido de carbono y que ha sido usado en otras ocasiones (Fuertes et al., 2015;



Marques & Pitarma, 2017). A parte de este sensor específico también existe el sensor MG-135, un sensor multi-gas que entre los gases que mide está el CO<sub>2</sub>.

Estos sensores, relacionan una medición física con una variación eléctrica, en el caso de los sensores de gas, la resistencia eléctrica varía con el diferencial de temperatura originado por la variación de concentración de gas. Esta medición de variación de resistencia u otros factores eléctricos, se debe correlacionar con una medida real, por lo que es necesario e imprescindible, realizar un calibrado preciso.



## **CAPÍTULO 3:**

### **CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

Como se ha comentado en el capítulo anterior, se plantea el uso de cementos MPC para la campaña experimental. El hecho de tener un material no convencional como son los cementos de fosfato de magnesio crean la necesidad de caracterizar y determinar sus características mecánicas.

El objetivo principal de este capítulo es determinar las características de los distintos materiales que se usarán. Conocer las características y las diferencias entre materiales, será determinante para poder analizar y entender los resultados de balances de CO<sub>2</sub> que se obtendrán en la fase experimental.

Por este motivo, en el presente capítulo se explica el proceso de caracterización de los materiales que se han usado a lo largo de la campaña

experimental. El capítulo se divide en tres bloques, en el primero de ellos, se plantea la campaña experimental que se va a realizar.

En el segundo, se presentan los materiales escogidos y se explican los diferentes métodos de ensayo que se han utilizado para caracterizar los distintos hormigones, tanto a nivel de resistencias como a nivel de biorreceptividad. En el tercer y último bloque, se presentan los resultados obtenidos de los distintos ensayos realizados.

Los parámetros objeto de estudio serán los siguientes: consistencia, resistencia a compresión, rugosidad del material y porosidad. La consistencia y la resistencia a compresión son características básicas que sirven para caracterizar el hormigón, estos parámetros se relacionan con la capacidad resistente que tiene el material.

Los parámetros porosidad y rugosidad, van estrechamente ligados con la biorreceptividad que tendrá el material, conocer la diferencia entre estos parámetros permite entender diferencias en el crecimiento biológico que se pueden producir.

## 3.2. PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL

Debido a que se plantea el uso de materiales no estandarizados, se requiere el conocimiento de sus características mecánicas. Por otro lado, para poder evaluar el crecimiento biológico, es necesario conocer las características de cada uno de los materiales en lo referente a la biorreceptividad.

Por este motivo, se plantean una serie de ensayos que permiten conocer los siguientes parámetros: consistencia, resistencia a compresión, rugosidad y porosidad. Una vez conocidos estos parámetros, se podrá realizar un análisis de las posibles variaciones en el crecimiento biológico en los distintos materiales.

El proceso de fabricación que se describe en el siguiente apartado, se enmarca dentro de una colaboración con la empresa española Escofet 1886 S.A., líder mundial en el desarrollo, fabricación y distribución de productos de hormigón arquitectónico. Durante el proceso de fabricación, se ha realizado el ensayo de consistencia siguiendo la normativa UNE-EN 1015-3 parte 3, para la determinación de la consistencia del mortero fresco (Española Asociación de Normalización y Certificación (AENOR), 2000).

Los ensayos de determinación de las resistencias, han sido realizados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Dichos ensayos se han realizado siguiendo la normativa UNE-EN 196-1 de determinación de resistencias mecánicas

en morteros (Española Asociación de Normalización y Certificación (AENOR), 2005)

En el caso de los ensayos de rugosidad, se han llevado a cabo en el laboratorio de la universidad de Gante, en Bélgica. Dado que para este ensayo no existe protocolo ni normativa a seguir, el ensayo se ha realizado según (Ondimu, 2008) y que también se realizó en la tesis doctoral de (Manso Blanco, 2014) para determinar la rugosidad.

Los ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio se han realizado en los laboratorios de los servicios tecnológicos de Málaga en el parque tecnológico de Andalucía, con un equipo micromeritics de la casa “MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION”. Para este ensayo, de igual modo que el ensayo de rugosidad, no existe un protocolo ni una normativa a seguir, el ensayo usado ha sido el de porosimetría por intrusión de mercurio según (Javier Alonso Rodríguez Departamento de Geología, 2002) que también se usó en la tesis doctoral (Manso Blanco, 2014)

Dicho procedimiento tiene ciertas limitaciones que pueden afectar al resultado final. El problema más grande que presenta es el hecho de que para obtener datos fiables todos los poros deben estar interconectados, en caso de existir poros aislados, el mercurio no puede penetrar y, por lo tanto, no reflejarse en los resultados. Aun teniendo limitaciones, este método da valores más parecidos a la realidad, dado que, en otros métodos, la presión ejercida puede romper el material entre poros.

### 3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.3.1. Materiales y dosificaciones

##### *Materiales*

Como se ha explicado en el capítulo 2 Estado del arte, se ha visto como los morteros de MPC, ofrecen una mayor biorreceptividad para el crecimiento de la *chlorella vulgaris* que los de OPC. Es por esto que, para esta campaña experimental, se ha planteado el uso de morteros MPC. Dado que el OPC es el tipo de cemento más empleado, no se ha podido despreciar en el análisis y, por ello, también se incluye una muestra de OPC en dicha campaña experimental.

Se ha considerado oportuno tomar como dosificaciones de referencia, las de OPC y MPC usada por (Manso Blanco, 2014)(Manso Blanco, 2014). El uso de una dosificación de la que no se tiene experiencia previa, puede llevar a resultados erróneos. La dosificación de OPC ref, contiene áridos de  $\phi$  0,5-1,5 mm, agua y CEMI 52,5R.

Para la dosificación de MPC ref se usan áridos de  $\phi$  0-0,2 mm,  $\phi$  0,2-0,5 mm y de  $\phi$  0,5-1,5 mm, agua, óxido de magnesio (MgO) y ADP como cemento y bórax como retardante. Este mortero tiene como base el ADP, esto conlleva que, en la reacción de endurecimiento se genere gas amonio. Debido a la peligrosidad de este gas, se han propuesto cuatro dosificaciones alternativas de MPC.

La primera y segunda alternativas a la de referencia consisten en la sustitución parcial o total del ADP por PDP, manteniendo el resto de componentes igual. En la primera (MPC ADP-PDP), se considera una sustitución del 50% del ADP por PDP mientras que en la segunda (MPC PDP), se hace una sustitución total.

La tercera alternativa (MPC PC8) consiste en la sustitución del MgO por el PC8. El PC8 es MgO obtenido como un subproducto de origen industrial. El hecho de reciclar un desecho de la industria, hace que sea más amable en cuanto al medioambiente se refiere. Para esta dosificación se sustituye el uso de bórax como retardante por Ácido bórico.

Para la última dosificación alternativa (MPC FA/S), se propone la sustitución de parte de los finos (MgO y PDP) de la dosificación MPC PDP por cenizas volantes. Se han realizado estudios y se ha demostrado que la sustitución por cenizas volantes es viable para la configuración de hormigones MPC (Gardner et al., 2015; Shijian & Bing, 2014; Yue, Jia, & Bing, 2014).

A modo de resumen, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los seis tipos de morteros que se usarán en el presente estudio. En ella, se puede observar la nomenclatura que se va a usar a partir de ahora para cada dosificación. También se observa la tipología de cemento, si OPC o MPC y los componentes de la pasta de cemento.

**Tabla 3.1 Tabla resumen de los morteros usados en la campaña experimental**

Nomenclatura	Tipo de cemento	Componentes
OPC ref	Portland (52,5 MPa)	-
MPC ref	Fosfato de magnesio	ADP + MgO
MPC ADP/PDP	Fosfato de magnesio	ADP/PDP + MgO
MPC PDP	Fosfato de magnesio	PDP + MgO
MPC PC8	Fosfato de magnesio	PDP + PC8
MPC FA/S	Fosfato de magnesio	PDP + MgO + Cenizas Volantes

### *Dosificaciones*

Para el diseño de las dosificaciones se ha tenido en cuenta una granulometría que permita el fraguado a la vez que genera un hormigón poroso. También se ha diseñado con retardante para que dé tiempo a poner en los moldes antes de empezar a fraguar.

Para que las microalgas puedan desarrollarse adecuadamente es necesario que dispongan de una fuente constante de nutrientes y agua. Esto hace que se

contemplan dos escenarios. El primero de ellos, contempla tener un material de características normales con un regado regular de las plantas.

El segundo escenario consiste en: tener un material lo suficiente poroso como para que pueda almacenar una cierta cantidad de agua. Esto permitiría al alga absorber agua y nutrientes sin necesidad de un regado continuo, es decir, sin necesidad de tener un gasto adicional en mantenimiento.

La ventaja que ofrece el almacenamiento de agua, es válida en el rango en el que la planta es capaz de absorberla. Una vez el agua se ha filtrado y almacenado en un punto en el que la planta no es capaz de absorberla, dicha ventaja se convierte en un problema de durabilidad del material.

Una vez planteados los dos escenarios, se escoge la fabricación de probetas porosas para reducir los posibles gastos de mantenimiento adicionales generados. Por ello, se buscará una relación de áridos gruesos y áridos finos que permita el fraguado del hormigón a la vez que el almacenamiento de agua.

Los materiales que se han usado para la fabricación de las probetas de OPC han sido áridos gruesos, cemento CEM I 52,5 R y agua. Para las probetas de MPC se han usado tres tamaños de árido, agua, MgO, ADP, PDP y PC8 como ligantes y borax o ácido bórico como retardante. En el caso de la dosificación de MPC FA/S, se han usado también cenizas volantes. En la Tabla 3.2 se muestran las dosificaciones que se han usado para las distintas probetas.

**Tabla 3.2 Tabla de dosificaciones usadas.**

<b>Materiales</b>	<b>OPC ref.</b>	<b>MPC ref.</b>	<b>MPC ADP/PDP</b>	<b>MPC PDP</b>	<b>MPC PC8</b>	<b>MPC FA/S.</b>
Árido fino Φ 0-0,2 mm (kg)	-			1,40		
Árido medio Φ 0,2-0,5 mm (kg)	-			3,10		
Árido grueso Φ 0,5-1,5 mm (kg)	13,70			9,20		
Agua (L)	1,30			0,95		
Cem I (52,5) (kg)	2,90			-		
MgO (kg)	-		2,01		-	1,01
PC8 (kg)			-		1,90	-
ADP (kg)	-	1,15	0,38		-	
PDP (kg)	-	-	0,77	1,15	1,27	0,58
Borax (kg)	-	0,19	0,32	0,19	-	0,09
Ácido Bórico (kg)			-		0,03	-
Cenizas Volantes (kg)			-			1,68

### 3.3.2. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de las probetas se llevó a cabo en la planta de la empresa de prefabricados de hormigón Escofet 1886, S.A., en Martorell. Para el proceso de fabricación se usaron dos tipos de moldes, rectangulares de 4x4x16 cm según la norma UNE-EN 196-12005 y cuadradas de 8x8x2 cm.

Las probetas de 4x4x16 cm se han usado para la determinación de la resistencia a compresión de los distintos hormigones. Las probetas de 8x8x2 cm, aparte de usarse para la campaña experimental, se han usado para los ensayos de rugosidad y porosimetría.

Debida la poca cantidad de material que se fabricó, el proceso de fabricación se realizó de forma manual mediante un mezclador eléctrico de hormigón en lugar de una amasadora de hormigón de eje vertical. En primer lugar, se mezclaron los componentes sólidos para garantizar que la mezcla fuese homogénea. Una vez realizada la mezcla, se añadió el agua y se mezclaron todos los componentes hasta tener el hormigón en un estado trabajable. En la Figura 3.1 se observa el proceso de mezcla del hormigón.



**Figura 3.1. Proceso de mezclado de los materiales**

En un principio, para dar mayor porosidad al hormigón, se planteó el uso únicamente de árido grueso ( $\Phi$  0,5 – 1,5 mm), al realizar la mezcla con únicamente éste tipo de árido, el proceso de fraguado solo se produjo en la dosificación de OPC ref, el resto de las muestras no endurecieron. Seguidamente se realizó la mezcla con un 10% más de pasta de cemento, se observó que aun aumentando el contenido de pasta de cemento en un 10%, la mezcla seguía sin endurecer correctamente.

Como solución a los problemas de endurecimiento, se optó por repartir el peso total del árido en tres tipologías, árido fino ( $\Phi$  0–0,2 mm) en un 10,2% del peso total de árido, árido de tamaño medio ( $\Phi$  0,2–0,5 mm) en un 22,6% del peso total de árido y el 67,2% restante, árido de tamaño grueso ( $\Phi$  0,5 – 1,5 mm). Con



esta repartición de árido, se consiguió el endurecimiento del hormigón. La dosificación final de las distintas probetas, es la comentada en la Tabla 3.2.

Una vez fabricado el material, se realizaron los ensayos de consistencia según la normativa UNE-EN 1015-3 y se colocaron en los distintos moldes. Cabe destacar que, dado su alto calor de hidratación inicial, las dosificaciones con contenido de ADP endurecían mucho antes que las que no lo contenían, endureciendo pocos minutos después de poner en el molde.

En la Figura 3.2 se muestra el hormigón una vez puesto en los distintos moldes usados. Dado que no se disponía de moldes suficientes para todas las dosificaciones, las probetas se desmoldaban pasadas 2-3 horas. En el caso de las dosificaciones OPC ref, MPC ref y ADP-PDP, el proceso de fraguado fue más rápido, endureciendo al cabo de pocos minutos. Por el contrario, las que únicamente tenían contenido de PDP, el proceso de fraguado fue mucho más lento,



Figura 3.2. a) hormigón puesto en los moldes de 4x416 cm, b) hormigón puesto en el molde de 8x8x2 cm

### 3.3.3. Ensayo de consistencia

El ensayo de consistencia se ha realizado según la norma UNE-EN 1015-3 parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). Para la realización de este ensayo son necesarios los siguientes aparatos: una mesa de sacudidas, un molde troncocónico, un pisón, un calibre, una paleta y una regla metálica. A continuación, se describen las dimensiones y características de los distintos aparatos según la normativa.

- La **mesa de sacudidas** compuesta de las siguientes partes: un bastidor, una placa y un disco, un eje horizontal y una leva de elevación y un eje de elevación.
- El **molde troncocónico** debe ser de acero inoxidable o latón, de 60 mm  $\pm$  0,5 mm de altura, con un diámetro interior de 100 mm  $\pm$  0,5 mm en la base y de 70  $\pm$  0,5 mm en la parte superior. El espesor mínimo de la pared ha de ser de 2,0 mm.

- Un **Pisón** de sección circular, que consiste en una barra rígida, no absorbente, de aproximadamente 40 mm de diámetro y 200 mm de longitud. La superficie debe ser plana y perpendicular al eje del pisón. La masa del pisón es de  $0,250 \text{ kg} \pm 0,0 \text{ kg}$ .
- Un **calibre** capaz de medir hasta 300 mm con precisión de 1 mm.
- Una **paleta**.
- Una **regla metálica para enrasar**.

En la Figura 3.3 se muestra el esquema del montaje de la mesa de sacudidas con los distintos aparatos acotados. En ella se observan los diferentes elementos comentados como el molde troncocónico, la mesa de sacudidas y el pisón.

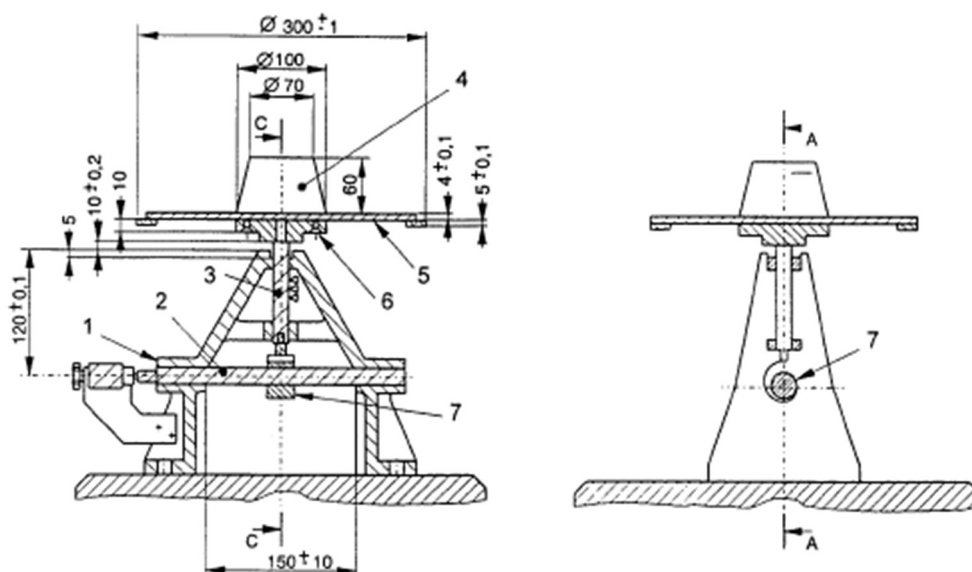


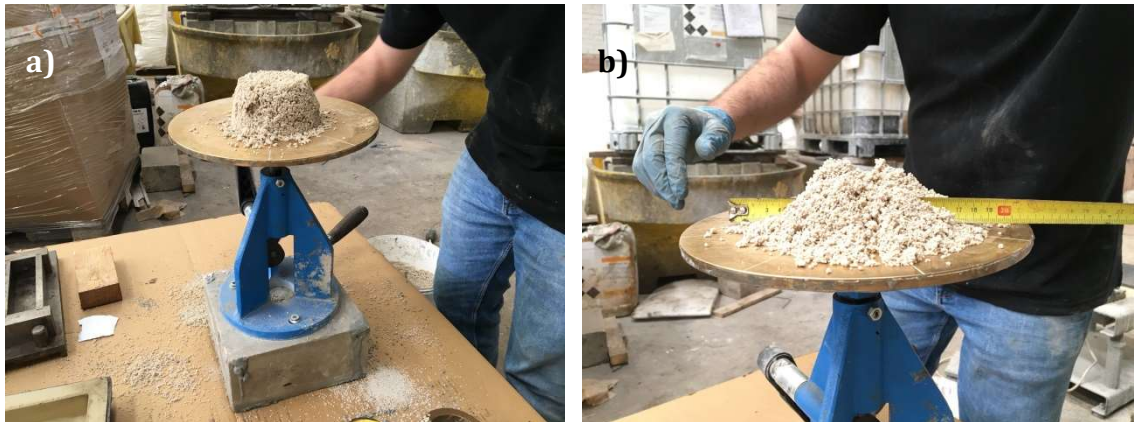
Figura 3.3. Esquema del ensayo de consistencia

El procedimiento del ensayo es el siguiente: antes de empezar se limpia el disco de la mesa de sacudidas, igual que la superficie interior y los bordes del molde, con ayuda de un paño húmedo. En caso de no haberse utilizado la mesa durante las últimas 24 h, se efectuarán 10 sacudidas antes de su uso.

Una vez limpiada la mesa y el molde, este se coloca en el centro de la mesa se introduce el mortero en dos capas, cada capa se debe compactar al menos con diez golpes del pisón, asegurando el llenado uniforme del molde. Una vez llenado el molde se elimina el exceso enrasando con la regla metálica. Después, durante 15 s, se levanta el molde lentamente y se imprimen 15 sacudidas a la mesa con una frecuencia constante, de una sacudida por segundo.

Una vez se han realizado las 15 sacudidas, se mide el diámetro del mortero en dos direcciones perpendiculares entre si y se anotan los resultados. En la Figura 3.4 se muestra la realización del ensayo de compactación, en la a) se observa el

mortero una vez quitado el molde y, justo antes de realizar las sacudidas. Por otro lado, en la b) se observa la medición del diámetro del mismo mortero una vez ejecutadas las 15 sacudidas.



**Figura 3.4. a) Mortero antes de realizar el ensayo de consistencia b) mediciones del ensayo de consistencia**

#### **3.3.4. Ensayo de resistencia a compresión**

El ensayo para medir la resistencia a compresión de los distintos hormigones ha sido el establecido por la normativa UNE-EN 196-12005 (Española Asociación de Normalización y Certificación (AENOR), 2000). Pudiéndose dar el caso que una probeta sea defectuosa, un material debe ensayarse como mínimo tres veces para tener un valor fiable, en caso de tener tres valores muy dispares, el ensayo se debe volver a repetir.

Dado que el ensayo de compresión se realiza con las mitades obtenidas por el ensayo de tracción, se han ensayado dos probetas a flexión, obteniéndose cuatro muestras para ensayar a compresión. Por lo tanto, cada uno de los materiales, se ha ensayado 4 veces a 1, 3, 7 y 28 días.

El ensayo de resistencia a compresión se ha realizado con la máquina ibertest del laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló de la escuela de caminos de la UPC. El procedimiento de ensayo para la determinación de la resistencia a compresión es el que se explica a continuación.

Una vez rotas las probetas a flexión, se coloca uno de los semiprismas obtenidos en la máquina. Del mismo modo en que para el ensayo a flexión se debe disponer de una forma en concreto, para el ensayo a compresión la superficie irregular debe quedar por la parte dónde no hay apoyo. En la Figura 3.5 se muestra el ensayo de compresión durante su realización y la probeta una vez ha roto. También se indica el lado por donde debe quedar la superficie irregular a la hora de realizar el ensayo.



Figura 3.5. a) Ensayo de resistencia a compresión b) probeta después del ensayo a compresión

### 3.3.5. Ensayo de rugosidad

El ensayo de rugosidad se ha realizado siguiendo lo establecido por (De Belie et al., 2004) y realizado por (Manso Blanco, 2014) en su tesis doctoral. El ensayo se ha llevado a cabo en la universidad de Gante, en Bélgica. Debido a la posibilidad de que alguna probeta fuera defectuosa o se dañara durante el transporte, se ha realizado el ensayo en tres probetas para cada uno de los materiales.

El procedimiento del ensayo consiste en poner las muestras en una mesa y, mediante un láser de alta precisión se genera un perfil de la superficie. En la Figura 3.6 se muestra de forma gráfica el significado de los parámetros  $R_q$  y  $R_a$ , que son los que permiten determinar la rugosidad.

$R_a$  y  $R_q$  son parámetros de rugosidad del perfil incluidos en la normativa británica BS EN ISO 4287:2000, idéntica a la normativa ISO 4287:1997. Estos parámetros se basan en el sistema “M” (línea media). El parámetro  $R_a$  es el valor promedio aritmético del perfil de rugosidad filtrada, determinado a partir de las desviaciones sobre la línea central dentro de la longitud de evaluación. El cálculo del parámetro  $R_a$  se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Por otro lado, el valor  $R_q$  representa la media cuadrática o RMS (del inglés *root mean square*), este valor es la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los valores, dicho parámetro se calcula de la siguiente forma:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad \text{Ecuación 3.2}$$



Para cada una de las muestras, se realizan 8 perfiles de superficie, para el ensayo, se han colocado las tres probetas del mismo material en fila y se ha analizado la rugosidad en sentido creciente del eje horizontal. En la Figura 3.8 se muestra el estado de las probetas al llegar al laboratorio de la Universidad de Gante, para su análisis se ha tenido en cuenta el estado de las probetas que llegaron en mal estado.

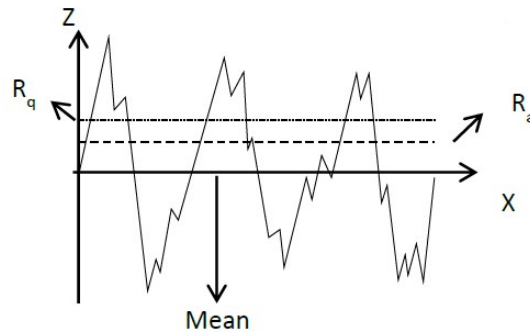


Figura 3.6. Esquema gráfico del significado de  $R_q$  y  $R_a$  (Manso Blanco, 2014)

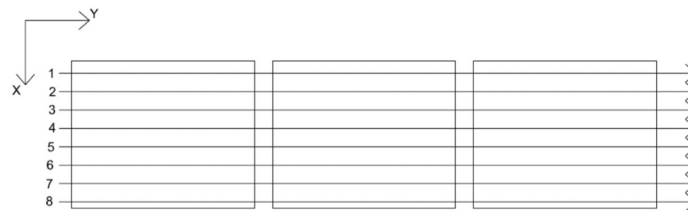


Figura 3.7. Esquema del ensayo de rugosidad.

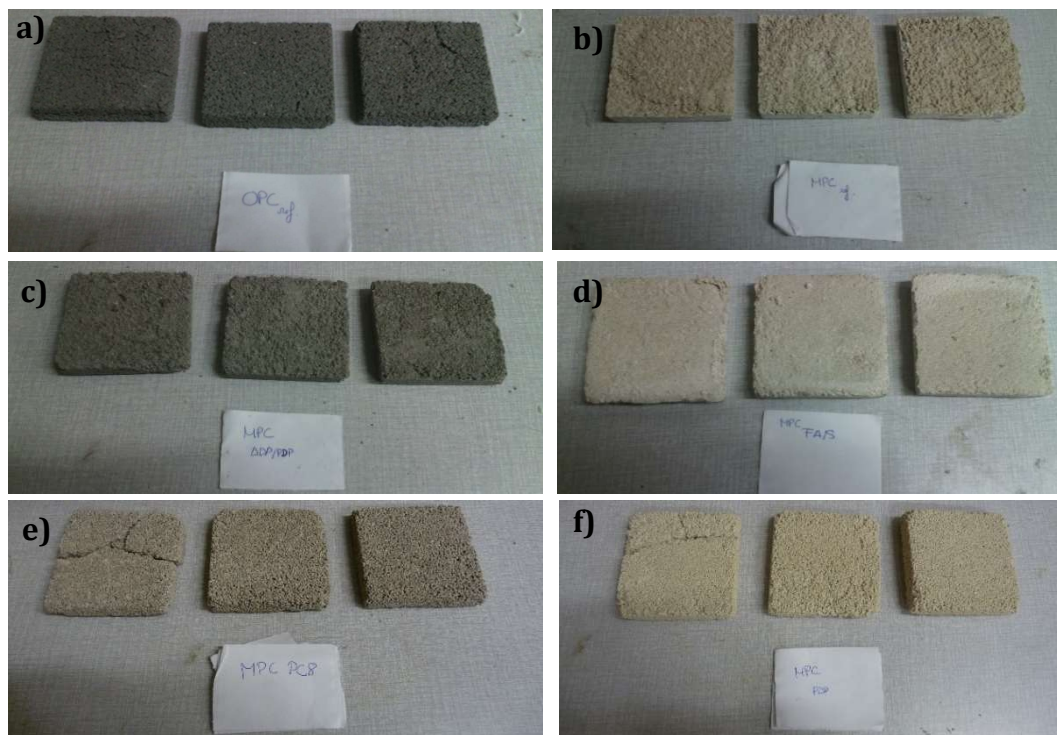


Figura 3.8. Estado de las probetas al llegar a la universidad de Gante. a) OPC ref b) MPC ref c) MPC ADP-PDP d) MPC FA/S e) MPC PC8 f) MPC PDP

### 3.3.6. Ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio

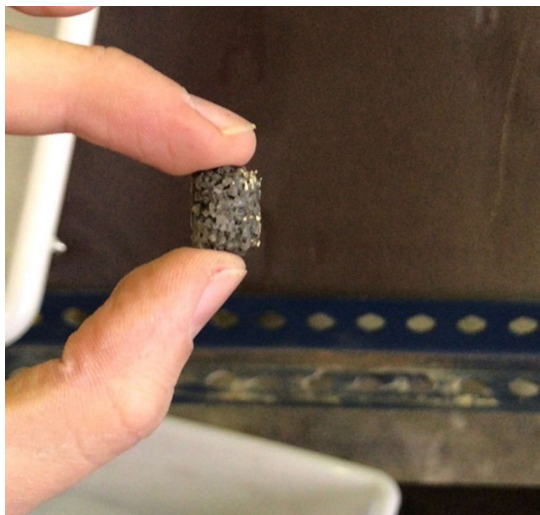
Para el ensayo de porosidad, se ha realizado el ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio según (Raymond A. Cook, 1999). Dicho procedimiento tiene ciertas limitaciones que pueden afectar al resultado final, el problema más grande que presenta dicho método es el hecho de que para obtener datos fiables todos los poros deben estar interconectados, en caso de existir poros aislados, el mercurio no puede penetrar y, por lo tanto, no reflejarse en los resultados. Aun teniendo limitaciones, este método da valores más parecidos a la realidad, dado que, en otros métodos, la presión ejercida puede romper el material entre poros.

Para este ensayo es conveniente el uso de un tamaño normalizado dada la influencia que tiene la incidencia del ángulo de contacto en los resultados. El tamaño máximo requerido es de 2 cm de altura y 1 cm de diámetro. El procedimiento del ensayo es el siguiente: En primer lugar, se debe limpiar la muestra y, una vez seca, pesar.

En segundo lugar, después de mantener durante al menos una hora en un vacío inferior a 1 KPa, se llenan los dilatómetros hasta un nivel prefijado de 10 cm. La pérdida controlada del vacío permite analizar el volumen poroso comprendido entre unas 70 y 7  $\mu\text{m}$ . Posteriormente se determina el peso del dilatómetro conteniendo la muestra y lleno de mercurio hasta el nivel prefijado P3 (debe conocerse el peso del dilatómetro lleno de mercurio hasta el citado nivel P1).

Posteriormente, se introducido el dilatómetro en una autoclave y cerrado éste, se ajustan los registros de presión y volumen para empezar el ensayo. Cada vez que un incremento de presión genera un descenso en el nivel de Hg, la bomba de presión se para y toma los registros. De acuerdo con el intervalo de presiones de trabajo, el rango de tamaños explorado va de 7 a 0.0037  $\mu\text{m}$ . Nada más finalizar el ensayo, se determina el peso de la muestra impregnada de mercurio P4 (Javier Alonso Rodríguez Departamento de Geología, 2002).

En la Figura 3.9 se muestra una de las muestras extraídas para el ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio, en ella se puede apreciar su pequeño tamaño. Estas muestras se obtuvieron mediante un taladrando con una corona de diamante las probetas de 8x8x2 cm, asegurando de este modo que la altura máxima de la muestra fuera de 2 cm.



**Figura 3.9. Muestra para ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio**

### **3.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

En este apartado se muestran los resultados de los distintos ensayos realizados, con el objetivo de determinar tanto las características mecánicas, como las características referentes a la biorreceptividad. También se realizará, para cada uno de los ensayos, un análisis que permita comprender los futuros resultados de crecimiento biológico.

Dado que se han realizado tres ensayos de determinación de las características mecánicas y dos para la determinación de la biorreceptividad, el capítulo tendrá 5 subapartados, uno para cada uno de los ensayos.

#### **3.4.1. Ensayo de consistencia**

En la Tabla 3.3 se muestran los resultados del ensayo de consistencia realizado según la norma UNE-EN 196-1 (Española Asociación de Normalización y Certificación (AENOR), 2005) En estos resultados se pueden observar varias cosas. En primer lugar, se observa que el material con mayor consistencia es el MPC PDP y, el que tiene menor consistencia, el MPC PC8.

También se observa que la desviación estándar del MPC PC8 y el MPC FA/S es mayor a la unidad, por lo que los resultados no son del todo fiables y debería realizarse de nuevo el ensayo. El hecho de que el MPC PC8 tenga una baja consistencia es debido a que tiene una relación agua cemento mayor a las demás. Al tener mayor cantidad de agua hace que el material sea más fluido y, por lo tanto, menos consistente.

Tabla 3.3. Tabla de resultados de consistencia

Material	Media (cm)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
OPC ref	16,50	0,71	0,04
MPC ref	15,95	0,64	0,04
MPC ADP-PDP	13,20	0,28	0,02
MPC PDP	10,00	0,00	0,00
MPC FA/S	16,00	1,41	0,09
MPC PC8	18,50	2,12	0,11

### 3.4.2. Ensayo de resistencia a compresión

Dado que el ensayo de compresión se realiza con las mitades obtenidas por el ensayo de tracción, se han ensayado dos probetas a flexión, obteniéndose cuatro muestras para ensayar a compresión. Por lo tanto, cada uno de los materiales, se ha ensayado 4 veces a 1, 3, 7 y 28 días.

Para detectar datos atípicos y no incluirlos en el análisis de los resultados de las resistencias a compresión, se ha usado el criterio de Dixon. Para realizar el cribado de datos mediante el criterio de Dixon, se han descartado los valores en los que la probeta rompió en la precarga y, por lo tanto, tienen valor nulo en cuanto a resistencia.

Dichos valores se han producido por las irregularidades de las probetas generadas en el proceso de desmoldado. En la Tabla 3.4 se muestran los resultados de resistencia a compresión de los distintos hormigones una vez descartados los datos atípicos.



Tabla 3.4. Tabla de resultados de los ensayos de resistencia a compresión

Probeta	T (días)	Resistencia (MPa)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
OPC ref	1	4,78	0,12	0,03
	3	5,57	1,04	0,19
	7	7,34	1,79	0,24
	28	9,31	1,09	0,12
MPC ref	1	0,82	0,06	0,07
	3	2,73	1,25	0,46
	7	3,83	1,16	0,30
	28	7,51	1,31	0,18
MPC ADP-PDP	1	0,56	0,11	0,19
	3	0,92	0,17	0,18
	7	4,08	0,76	0,19
	28	3,24	0,15	0,05
MPC PDP	1	1,32	0,44	0,33
	3	1,30	0,08	0,06
	7	2,98	1,85	0,62
	28	2,87	1,08	0,37
MPC FA/S	1	0,76	0,05	0,06
	3	4,51	0,70	0,16
	7	5,91	0,51	0,09
	28	3,99	0,67	0,17
MPC PC8	1	1,39	0,24	0,17
	3	1,79	0,82	0,46
	7	3,57	0,81	0,23
	28	3,01	1,29	0,43

En la Figura 3.10 se muestra la evolución de la resistencia a compresión de las diferentes muestras de hormigones. Para todas las muestras se observa un crecimiento rápido a edades tempranas. Este rápido crecimiento es dado por la reacción de hidratación de la pasta de cemento, una vez endurecido, el hormigón sigue hidratándose y ganando resistencia, pero de una forma menos notoria.

Otro dato que cabe destacar es que, debido a su alta porosidad, su resistencia es menor a la de un hormigón convencional. Un claro ejemplo de ello es la muestra de OPC ref., que para el cemento que se usa, en condiciones normales debería alcanzar 52,5 MPa a los 28 días. Sin embargo, adquiere una resistencia de aproximadamente 9 MPa, es decir, un 17% de la resistencia teórica en condiciones de porosidad normales.

Esto es debido a que al tener una curva granulométrica con mucho árido grueso y muy poco fino, hace que el hueco entre partículas grandes no se llene con finos y, por lo tanto, el contacto entre partículas sea bajo. El tener poco contacto entre partículas hace que la fuerza necesaria para romper las uniones sea baja y, por consiguiente, se adquiera poca resistencia.

Comparando la resistencia del OPC ref. con otros estudios de hormigones porosos observamos que la resistencia final adquirida es parecida a la obtenida para estas relaciones agua / cemento y porosidad (Lian, Zhuge, & Beecham, 2011; Xu et al., 2018).

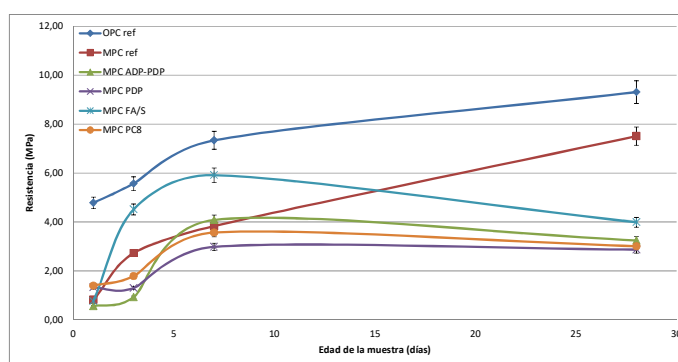
Analizando con más detalle las distintas curvas, podemos observar que la resistencia del OPC ref. a los 7 días es de un 79% de la resistencia total adquirida, porcentaje superior al dado por la antigua normativa EHE-1998 en la tabla 30.4.b. para hormigones de endurecimiento rápido. Algo similar pasa con el MPC ref. aunque el porcentaje es únicamente del 51% de la resistencia total adquirida.

Por el contrario, en las dosificaciones que contienen PDP, su resistencia a 7 días es mayor que a la de 28 días. En el caso de la dosificación de ADP-PDP, vemos que a los 7 días tiene una resistencia de 4,08 MPa y a los 28 días 3,24 MPa, un descenso del 21%. Para las dosificaciones de FA/S y PC8 las resistencias tienen un descenso del 33% y del 16% respectivamente mientras que en la dosificación de PDP, el descenso es prácticamente nulo, un 4%.

En la tesis doctoral de (Manso Blanco, 2014) se observó que para dosificaciones con un contenido igual o mayor al 4% de ácido bórico, la reacción de hidratación se detenía, haciendo descender el valor de la resistencia final. En este caso, la única dosificación con ácido bórico es la de PC8 y en menor porcentaje, por lo que no es aplicable.

Revisando bibliografía, el uso de PDP como sustitución del ADP es habitual y no perjudica a la resistencia final (Park, Kim, & Ann, 2016; Yue & Bing, 2013). Dado que el curado no se realizó en una cámara húmeda, que el único parámetro distinto a otros trabajos es la porosidad y, dado que el PDP tarda más en hidratarse que el ADP, que la pérdida de agua al cabo del tiempo por la alta porosidad, frenara la reacción de hidratación.

También se observa como la resistencia inicial de la dosificación con cenizas volantes es mayor a las dosificaciones sin cenizas volantes. Esto viene dado porque las cenizas volantes están compuestas por cenosferas esféricas, haciendo que puedan ocupar los poros de la matriz.



**Figura 3.10. Evolución de la resistencia a compresión de las probetas**

### 3.4.3. Ensayo de rugosidad

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados de rugosidad, en ella se observa como las probetas con mayor rugosidad son la de OPC ref y la de MPC PC8. En el caso de las muestras de OPC ref., su alta rugosidad en comparación a las de MPC es debido a que, para hacer el mortero se usó únicamente el árido más grueso.

En el caso de las probetas de PC8, el ser un subproducto industrial hace que la necesidad de agua sea mayor a las de MgO y no sea tan eficaz. Para compensar dicho aumento de la absorción de agua, se aumentó la relación agua cemento, aún con estas medidas, la mayor necesidad de agua y, el menor rendimiento del PC8 respecto del MgO generan una superficie más rugosa que las probetas con MgO.

Se observa como las probetas con contenido de PDP tienen más rugosidad, esto es debido a su alta demanda de agua y su largo proceso de endurecimiento respecto a las probetas de ADP. Como se comentó en el apartado de consistencia, su proceso de endurecimiento empieza antes y, como se observa en el apartado de resistencia a compresión, el proceso de endurecimiento es más lento que el del ADP, haciendo que se pierda más agua y, por consiguiente, dejando una superficie más rugosa.

En el caso del hormigón con cenizas volantes, aun sin tener contenido de ADP y siendo todo PDP, su rugosidad es parecida al de la mezcla entre ADP y PDP debido a que las cenizas volantes llenan parte de los poros que generan los áridos.

**Tabla 3.5. Resultados del ensayo de rugosidad**

<b>Muestra</b>	<b><math>r_a</math> (mm)</b>	<b><math>r_q</math> (mm)</b>
<b>OPC ref</b>	0,268	0,382
<b>MPC ref</b>	0,100	0,131
<b>MPC ADP - PDP</b>	0,168	0,199
<b>MPC PDP</b>	0,251	0,343
<b>MPC FA/S</b>	0,161	0,231
<b>MPC PC8</b>	0,278	0,353

### 3.4.4. Ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio

En la Tabla 3.6 se muestran los resultados obtenidos del análisis de porosimetría por intrusión de mercurio, en ella se puede ver como la porosidad total de las probetas esta entre el 15 y el 23 % es decir, aproximadamente una quinta parte del volumen total de la probeta son poros. También se observa como la dosificación con el tamaño de poro menor es la de cenizas volantes, siendo consistente con lo comentado acerca de que las cenizas volantes rellenan mejor los huecos y, por lo tanto, generando un tamaño de poros menor.

También se observa como las dosificaciones con mayor % de porosidad son aquellas que contienen ADP, esto es dado por la liberación de gas amonio durante el proceso de endurecimiento. Al liberar gas, se generan cavidades dentro del hormigón haciéndolo más poroso, algo parecido a lo que ocurre a las fibras plásticas en caso de incendio, se deshacen generando vías de escape para el vapor de agua.

Por el contrario, la dosificación con menor % de porosidad es la que contiene cenizas volantes, de igual forma que las cenizas volantes rellenan los poros haciéndolos más pequeños, también hace que existan menos poros y, por lo tanto, siendo la dosificación menos porosa.

También se puede observar como el orden de las dosificaciones con mayor área de poros, es prácticamente el mismo que el de rugosidad. Que ambos resultados sean muy parecidos es coherente, dado que la existencia de mayor número de poros en superficie se traslada a mayor rugosidad.

**Tabla 3.6. Tabla de resultados del análisis de porosimetría por intrusión de mercurio**

	OPC ref	MPC ref	MPC ADP-PDP	MPC PDP	MPC FAS	MPC PC8
<b>Total Intrusion Volume (mL/g)</b>	0,08	0,09	0,11	0,08	0,07	0,08
<b>Total Pore Area (m<sup>2</sup>/g)</b>	1,35	0,64	0,81	0,70	0,69	1,10
<b>Median Pore Diameter (Volume) (nm)</b>	5145,60	4742,20	56417,95	135101,45	1231,45	71382,10
<b>Median Pore Diameter (Area) (nm)</b>	17,80	72,90	28,75	12,60	54,75	22,60
<b>Average Pore Diameter (4V/A) (nm)</b>	251,65	567,80	600,55	461,25	415,60	296,15
<b>Bulk Density at 0,0036 Mpa (g/mL)</b>	2,19	2,06	1,97	2,16	2,16	2,15
<b>Apparent (skeletal) Density (g/mL)</b>	2,63	2,53	2,55	2,62	2,55	2,60
<b>Porosity (%)</b>	16,52	18,53	22,59	17,47	15,40	17,43

### 3.5. CONCLUSIONES

Los diferentes ensayos que se han realizado en este apartado concluyen que la dosificación más resistente es la de OPC, a su vez, esta misma configuración de matriz también genera mayor rugosidad, siendo favorable para el crecimiento biológico. El tener mayor porosidad es una ventaja la hora del almacenamiento de agua a una profundidad que las plantas puedan absorber el agua, por lo tanto, desde un punto de vista dónde únicamente se tienen en consideración los ensayos, se espera que el OPC tenga más biorreceptividad que el resto de dosificaciones.

Aun teniendo en cuenta los datos de los ensayos, se ha comentado en el estado del arte que el OPC ofrece menos biorreceptividad que los MPC a nivel de material, por lo tanto, aun teniendo mayores prestaciones a nivel geométrico, podría no ser suficiente para obtener mayor biorreceptividad que las probetas formadas por MPC.

En la misma línea que el OPC se encuentra el PC8, mayor rugosidad y área de poros y poco porcentaje de porosidad, esto hace que lo esperado para el PC8 sea semejante a lo esperado en el OPC. El hecho de ser de MPC, que ya en si ofrece

mayor biorreceptividad que el OPC juntamente a tener unas características geométricas más adecuadas que el resto de dosificaciones hace pensar que dicha dosificación tenga mejor respuesta que el resto. A parte cabe destacar que la matriz está formada por un producto residuo de la industria, haciendo más interesante su uso.



## **CAPÍTULO 4:**

### **CAMPAÑA DE CRECIMIENTO BIOLÓGICO**

#### **4.1. INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo, se explican los procesos necesarios para poder desarrollar la campaña de crecimiento biológico. El capítulo se divide en tres bloques, en el primero de ellos, se explica el planteamiento de la campaña experimental de crecimiento de algas.

En el segundo, se detalla el montaje de la estructura necesaria para poder realizar el ensayo de crecimiento de algas. También se explica la metodología del ensayo de crecimiento y de los ensayos de evaluación del crecimiento. En el último, se muestran los resultados y se hace un análisis de los mismos.

El objetivo principal de este capítulo es explicar con detalle cada uno de los pasos y, todo el montaje necesario para poder realizar el ensayo. También se pretende determinar que materiales de los estudiados han tenido más colonización y, por lo tanto, han sido más biorreceptibles.

## 4.2. PLANTEAMIENTO DEL ENSAYO

El método del crecimiento acelerado de algas fue desarrollado en el laboratorio “Magnet Laboratory for Concrete Research” en la Universidad de Gante (Bélgica) por (De Muynck, Ramirez, De Belie, & Verstraete, 2009). Dicho ensayo consiste en mantener los cultivos en un régimen de luz – oscuridad de 12 horas, y ciclos de regado continuo de un medio de cultivo acuoso (específico según el tipo de alga) de 1 hora y 30 minutos.

El tipo de alga usado es la “*Chlorella vulgaris* var. *viridis* Chodat”, un alga verde unicelular perteneciente al reino Protista. La *Chlorella* contiene clorofila en su cloroplasto, mediante la fotosíntesis se multiplica rápidamente, requiriendo sólo luz solar, CO<sub>2</sub>, agua y pequeñas cantidades de minerales (medio de cultivo).

La muestra de este espécimen se obtuvo del banco español de algas (BEA), en Gran Canaria (<http://marinebiotechnology.org/es/>). El medio de cultivo se preparó con según el método Bold’s Basal Medium (BBM) tal y como se especifica en el BEA (<http://marinebiotechnology.org/es/component/virtuemart/medios-de-cultivo/medios-de-agua-dulce/bbm-3v-detail?Itemid=0>).

Para la realización de este ensayo es necesario cierto equipamiento. El ensayo consiste en poner las probetas con una inclinación a 45° con ciclos de luz – oscuridad de 12 h y, ciclos de regado de 1,5 h cada 12 h. Dados los requerimientos geométricos y de instalaciones se ha propuesto el montaje de dos bastidores con una superficie plana con 45° de inclinación, cumpliendo así las condiciones de geometría del ensayo.

Para poder cumplir de forma rigurosa los ciclos de luz y de regado, se instalaron fluorescentes, bombas de aire y bombas de agua que, mediante unos temporizadores, garantían los ciclos. Para el regado, se pusieron depósitos con las algas, el medio de cultivo y el agua necesarios para el desarrollo de las algas.

Dado que se generaban pérdidas de cultivo de algas debidas a: el regado de las probetas, las conexiones de tubos y bombas y el calor de los fluorescentes, el cultivo de algas debía ser repuesto de forma periódica. La reposición del cultivo se planteó de forma semanal, para ello se hacía de forma semanal un cultivo de algas aparte, permitiendo así la reposición del medio de cultivo con las suficientes células.

## 4.3. METODOLOGÍA

A continuación, se expone la metodología seguida durante el desarrollo de la campaña experimental expuesta. Dado que la campaña tiene tres partes claramente diferenciadas, se dividirá en dos subapartados. El primero hablará de la confección de los bastidores.



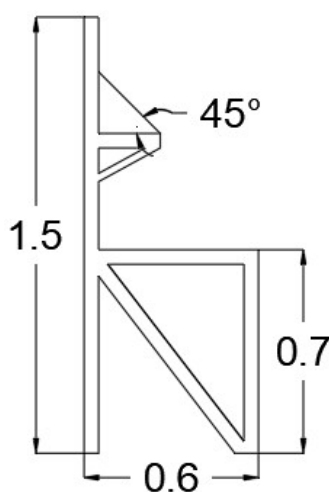
En el segundo subapartado, se expondrá la campaña en sí, desde la preparación del medio de cultivo, hasta el momento en que se finaliza el ensayo, pasando por el escalado de las algas y el conteo celular.

### 4.3.1. Bastidores

El proceso de montaje de la estructura se ha realizado mediante barras tipo estantería de la casa Mecalux. Dichas barras tienen orificios cada cierta distancia que, mediante tornillería y escuadras, permiten una unión rígida entre sí. Estas se han cortado y ensamblado a medida para poder realizar el montaje correctamente.

El ensayo de crecimiento acelerado de algas realizado tal y como lo hizo (Manso Blanco, 2014) requiere una estructura que permita la colocación de las probetas en un ángulo de  $45^\circ$ . Debido a que el lugar de realización del ensayo es determinante en cuanto a la geometría, se han realizado dos bastidores de 1,5 m de alto por 1,5 m de largo y 0,6 m de ancho.

El hecho de realizar dos bastidores de 1,5 m en lugar de uno de 3,0 m viene dado por la longitud máxima de las barras de Mecalux (2,0 m) y, por la mejor estabilidad que presentan dos estructuras en lugar de una sola. La geometría al detalle se muestra en la Figura 4.1, en ella se pueden observar barras dispuestas para asegurar la estabilidad en la puesta de carga. También se detalla que el ángulo en el que se dispondrán las bandejas con las probetas.



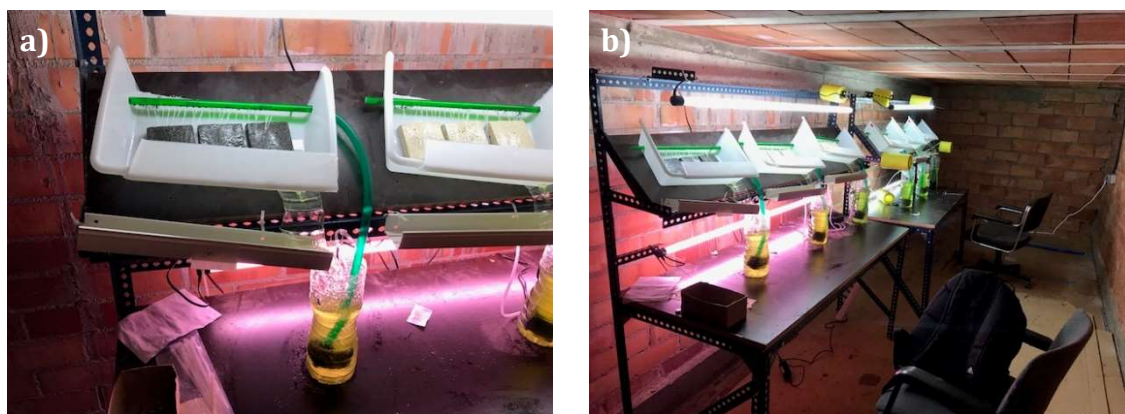
**Figura 4.1. Esquema del perfil longitudinal de los bastidores.**

Las bandejas que soportan las probetas son de plástico, de esta forma se asegura que el agua fluya y no se filtre por la madera, para asegurar la mínima pérdida de agua al caer, se han modificado cortando la parte superior (para facilitar la entrada de luz) y pegando los recortes ortogonales a las alas de las bandejas. Para el soporte de las probetas en las bandejas, se han usado recortes de un tubo de 7 mm de diámetro pegadas con silicona térmica.

En la Figura 4.1 a) se muestra el detalle de una de las bandejas de plástico con el montaje de la instalación de riego, se puede ver los dos tubos que permiten

la llegada del cultivo de algas a las probetas y la canal de desagüe. Los tubos se escogieron de tamaño  $\phi_{\text{ext}} 12 \phi_{\text{int}} 9$  y  $\phi_{\text{ext}} 9 \phi_{\text{int}} 7$  para facilitar la unión entre ellos. Dada la flexibilidad del tubo de mayor diámetro, el encaje entre los dos tubos es sencillo y no requiere adhesión con otros materiales.

En Figura 4.2 la b) se pueden observar los dos bastidores colocados y con toda la instalación necesaria para garantizar los ciclos de luz y de riego. También se observan los depósitos con el cultivo de las algas, estos se hicieron con botellas de agua de 2L.



**Figura 4.2. a) Detalle de las bandejas y del sistema de riego b) imagen general de los bastidores**

Se han escogido recipientes de agua de 2 L porque los depósitos menores a 2L, en caso de tener muchas pérdidas, no aseguran que una vez pasada la semana aún quede cultivo de algas. Por otro lado, aun teniendo recipientes de mayor capacidad, si la forma no es alargada, el volumen de cultivo podría quedar por debajo de la entrada de agua de la bomba y, por consiguiente, no garantizar el riego. A la hora de escoger el recipiente, también se debe tener en cuenta el diámetro, dado que la bomba debe entrar.

#### 4.3.2. Ensayo acelerado de algas

El ensayo acelerado consiste en hacer circular sobre la superficie de las probetas fabricadas una disolución de algas con medio de cultivo durante 1h y 30 minutos cada 12 h. El procedimiento se realiza, con el fin de que las algas crezcan en la superficie de las probetas.

Para el ensayo de crecimiento acelerado de algas, se pidieron al BEA 20 ml de concentrado de algas del tipo *chlorella vulgaris*. Se ensayan 6 dosificaciones diferentes de probetas y se ha dispuesto un recipiente de 2L para cada una de ellas, en total 12 L de mezcla de algas, agua y medio de cultivo. Para poder abastecer los 6 depósitos de 2 L, se necesitan como mínimo 2 L de concentrado de alga, para conseguir este volumen a partir de los 20 mL se ha realizado un escalado.

El escalado se realiza con factor 1:10, esto significa que cada vez que se hace el escalado obtienes 10 veces el volumen inicial. El proceso de escalado dura una

semana, por lo que conseguir 2 L de concentrado significa realizar 2 escalados y, por lo tanto, toma 2 semanas. En el caso del primer escalado realizado, se mezclaron 20 mL de algas con 180 mL de medio de cultivo, según las especificaciones de la Tabla 4.1. Dado que un volumen de 200 mL no es suficiente para abastecer los 6 recipientes, se ha realizado un segundo escalado, pasando de 200 mL a 2.000 mL.

El medio de cultivo preparado para el crecimiento de la *chlorella vulgaris* ha sido el especificado por el BEA, que consiste en el medio cultivo tipo *Bold's Basal Medium* (BBM). En la Tabla 4.1 se muestran los reactivos de los que se compone este tipo de medio de cultivo y las cantidades para 1 L de medio de cultivo.

**Tabla 4.1. Medio de cultivo tipo BBM**

Componente	Concentración (g. L-1 dH2O)	Adición para 1 L de medio de cultivo (ml)
NaNO3	25,00	10,00
CaCL2 · 2 H2O	2,50	
MgSO4 · 7 H2O	7,50	
K2HPO4		
K2H2PO4	17,50	
NaCl	2,50	
EDTA (Triplex III)	50,00	1,00
KOH	31,00	
FeSO4 · 7 H2O	4,98	
H2SO4	1,00 ml	
H3BO3	11,42	
ZnSO4 · 7 H2O	8,82	
ZnCl2 · 4 H2O	1,44	
MoCl2 · 4 H2O	0,71	
CuSO4 · 5 H2O	1,57	
Co(NO3)2 · 6 H2O	0,49	

Para la preparación del medio de cultivo, se realizaron las disoluciones de cada uno de los reactivos. Se mezclaron en la proporción correspondiente (ver Tabla 4.1) y se llevaron a 2 L con agua. Es necesario esterilizar este medio antes de añadir las algas, para ello se emplea un autoclave (ver Figura 4.3). Dado que el Erlenmeyer de 2 L no cabe en el autoclave, se dividió el medio de cultivo en Erlenmeyer más pequeños. Una vez listo el medio de cultivo, se puso algodón, papel de aluminio y cinta de autoclavado en el Erlenmeyer.

Seguidamente se ponían los Erlenmeyer en el autoclave a 50 Hz y durante 30 minutos (frecuencia de la electricidad en España y tiempo recomendado para esterilización de líquidos según el fabricante). Una vez pasado el tiempo, se debe esperar a que la presión del autoclave alcance los 0 Bar.

Antes de abrir el autoclave, se debe abrir la válvula lateral para que acabe de salir el vapor. Una vez esterilizado, se procede con la mezcla del medio de cultivo con las algas. En la Figura 4.5 se muestran el Erlenmeyer con el medio de cultivo (a) y el autoclave (b).



**Figura 4.3. a) Erlenmeyer con medio de cultivo b) autoclave**

Una vez mezcladas las algas con el medio de cultivo, se ponen en el agitador magnético a 200 rpm. En la Figura 4.4 se puede ver el Erlenmeyer de 2 L con la mezcla de algas, medio de cultivo y agua en el agitador magnético. Figura 4.5. a) Esquema de la cuadrícula del hemocitómetro b) imagen de la cuadrícula central del hemocitómetro c) imagen de la cuadrícula 1 del hemocitómetro.



**Figura 4.4. Erlenmeyer de 2 L con algas**

En el ensayo se especifica que en cada uno de los recipientes debe haber una concentración de  $6,5 \times 10^8$  células/litro, por lo tanto, se debe realizar un conteo de células. Con este conteo y, sabiendo la concentración existente, se llega a una relación de algas – medio de cultivo a poner en cada uno de los recipientes. Dado que el medio cultivo se ha de reponer semanalmente, las proporciones variarían para poder satisfacer esta condición.

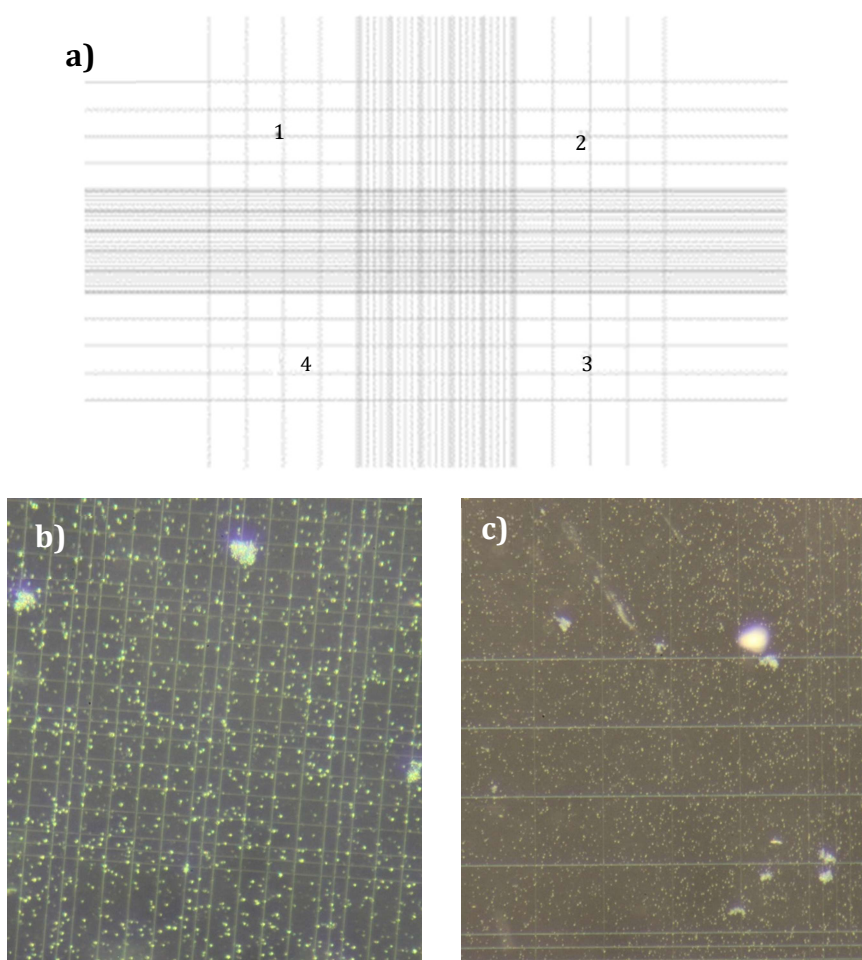
La determinación de la concentración celular, consiste en contar el número total de células que hay en una cuadrícula de un hemocitómetro. Para hacer el conteo de células se ha usado: un microscopio y un hemocitómetro. Debido a la gran cantidad de células que presenta el concentrado de algas, para realizar el



contaje se ha tenido que diluir a 1:100. Por lo tanto, la concentración final será 100 veces mayor.

El procedimiento que suele emplearse y que se ha usado es el siguiente: Usando una pipeta se colocan 10 $\mu$ L de la muestra en cada ranura del hemocitómetro. Para el contaje es importante mantener un orden en la secuencia del contaje para evitar errores de suma.

Dado que la concentración es baja, se han contado los cuadrantes 1, 2, 3 y 4 como se muestra en la Figura 4.5 (a). En esta misma Figura 4.5 se muestra como se observan la cuadrícula central (b) y la cuadrícula 1 (a) con el microscopio.



**Figura 4.5. a) Esquema de la cuadrícula del hemocitómetro b) imagen de la cuadrícula central del hemocitómetro c) imagen de la cuadrícula 1 del hemocitómetro.**

Una vez llenos los recipientes, se empieza el ensayo. Para este ensayo se han colocado las probetas en los bastidores, y se conectaron las bombas a unos temporizadores para regular el régimen de luz – oscuridad y los ciclos de regado. Para los ciclos de regado, a parte del uso de temporizadores, se han usado los recipientes de 2 L de para el almacenamiento del cultivo de algas.

### 4.3.3. Ensayo de colorimetría

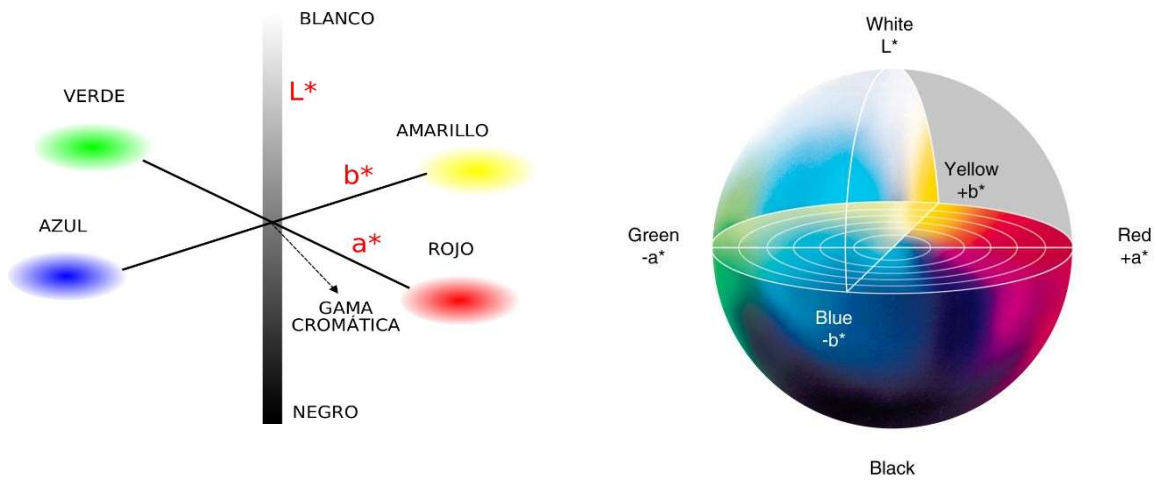
Para la evaluación del crecimiento de las microalgas, se han usado dos ensayos, el primero de ellos es el ensayo de colorimetría. Actualmente los métodos colorimétricos son aceptados para monitorizar el crecimiento biológico en superficies. Este ensayo se realizó con un colorímetro portátil CR-200 de la casa KONICA MILOTA mostrado en la Figura 4.6.



**Figura 4.6. Colorímetro CR-200 KONICA MILOTA**

Los colorímetros se basan en el sistema CIELab, este sistema define el color de un objeto basándose en dos coordenadas cromáticas  $a^*$  y  $b^*$  y un factor de luminosidad  $L^*$ . La componente  $a^*$  define si un color es verde (si es negativo) o si es rojo (si es positivo). La componente  $b^*$  define si el color es azul (negativo) o amarillo (positivo).

En el caso del factor de luminosidad, define si es blanco o si es negro. En la Figura 4.7 se muestra gráficamente el espacio Lab. Se puede observar que es parecido a un espacio tridimensional pero que, en lugar de tener coordenadas que representan una posición en el espacio, sus coordenadas representan un color.



**Figura 4.7 Representación gráfica del espacio Lab (Grimaldos, n.d.)**

A partir de las mediciones  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  y  $\Delta b^*$  se obtienen: la diferencia de color ( $\Delta E^*$ ), las variaciones cromáticas ( $\Delta C^*$ ) y los cambios de matiz ( $\Delta H^*$ ) usando las siguientes ecuaciones: (De Ferri, Lottici, Lorenzi, Montenero, & Salvioli-Mariani, 2011; De Muynck et al., 2009).

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$\Delta C^* = \sqrt{(a_t^*)^2 + (b_t^*)^2} - \sqrt{(a_0^*)^2 + (b_0^*)^2} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

$$\Delta H^* = \sqrt{(\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Este ensayo se realizó de forma semanal con unas condiciones de humedad y posición fijas. Para la realización del ensayo se retiraba el exceso de agua con un papel y se realizaba la medición en el centro de las probetas.

#### 4.3.4. Análisis de imágenes

El segundo ensayo realizado para la evaluación del crecimiento de microalgas en las probetas ha sido mediante la diferencia de área colonizada en las probetas. Para poder saber el área colonizada, se han tomado fotografías semanales. Con la ayuda del programa gratuito de análisis de imágenes *Image J*, se han procesado las imágenes.

El proceso de análisis es el *threshold analysis*, análisis propuesto por (De Muynck et al., 2009) para determinar el área cubierta por algas mediante el umbral  $a^*$  y  $b^*$ . Para realizar este análisis, en primer lugar, se determina gráficamente el valor en la unidad deseada de los píxeles. Hecha la conversión de píxeles a, en este caso, centímetros, se hace el procesamiento de la imagen.

Para realizar el procesamiento de las imágenes se usó la función *threshold*, esta función permite separar los colores en blanco y negro según el espacio CIELab.

Debido a que esta función solo se puede usar con escala de grises, en primer lugar, mediante la función *threshold color* se transforma el área de color verde en área de color negra. Una vez realizado este paso, se separan los colores en tres canales, rojo, azul y verde, obteniendo así una escala de grises.

Una vez se obtiene el área de grises, se usa la función *threshold*, de esta forma se obtiene que el área colonizada es representada de color negro y, el área no colonizada en color blanco.

En la Figura 4.8 se muestra el proceso realizado para pasar de la imagen inicial a la imagen después de realizar el *threshold*, que nos indica en color negro el área que se ha colonizado y, en color blanco, el área que no ha sido colonizada. Posteriormente, mediante la función de análisis *histogram* se calculó el tamaño total de los píxeles de color negro, es decir, colonizados, mediante la conversión inicial hecha, se obtiene el valor en centímetros cuadrados.

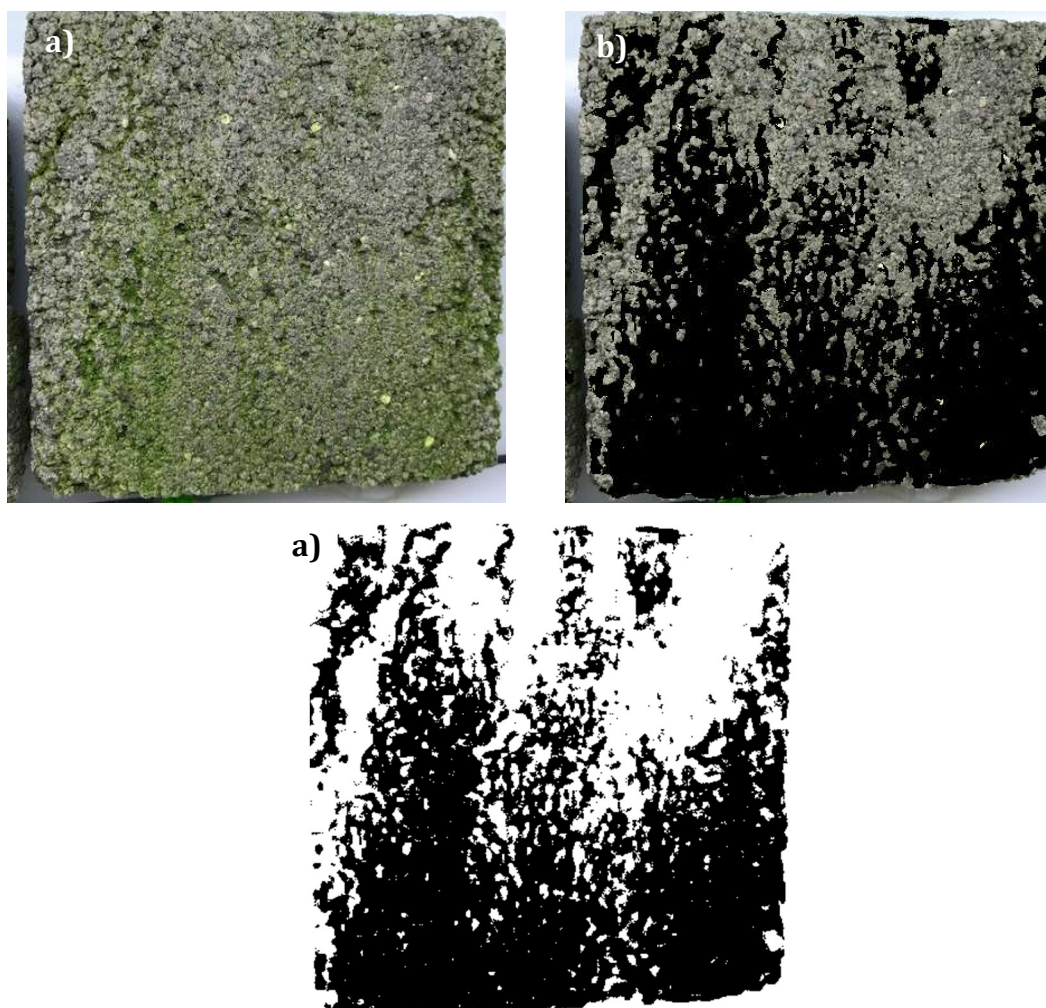


Figura 4.8. a) imagen sin tratar b) imagen separada según a\* c) análisis de imagen *threshold* B&W

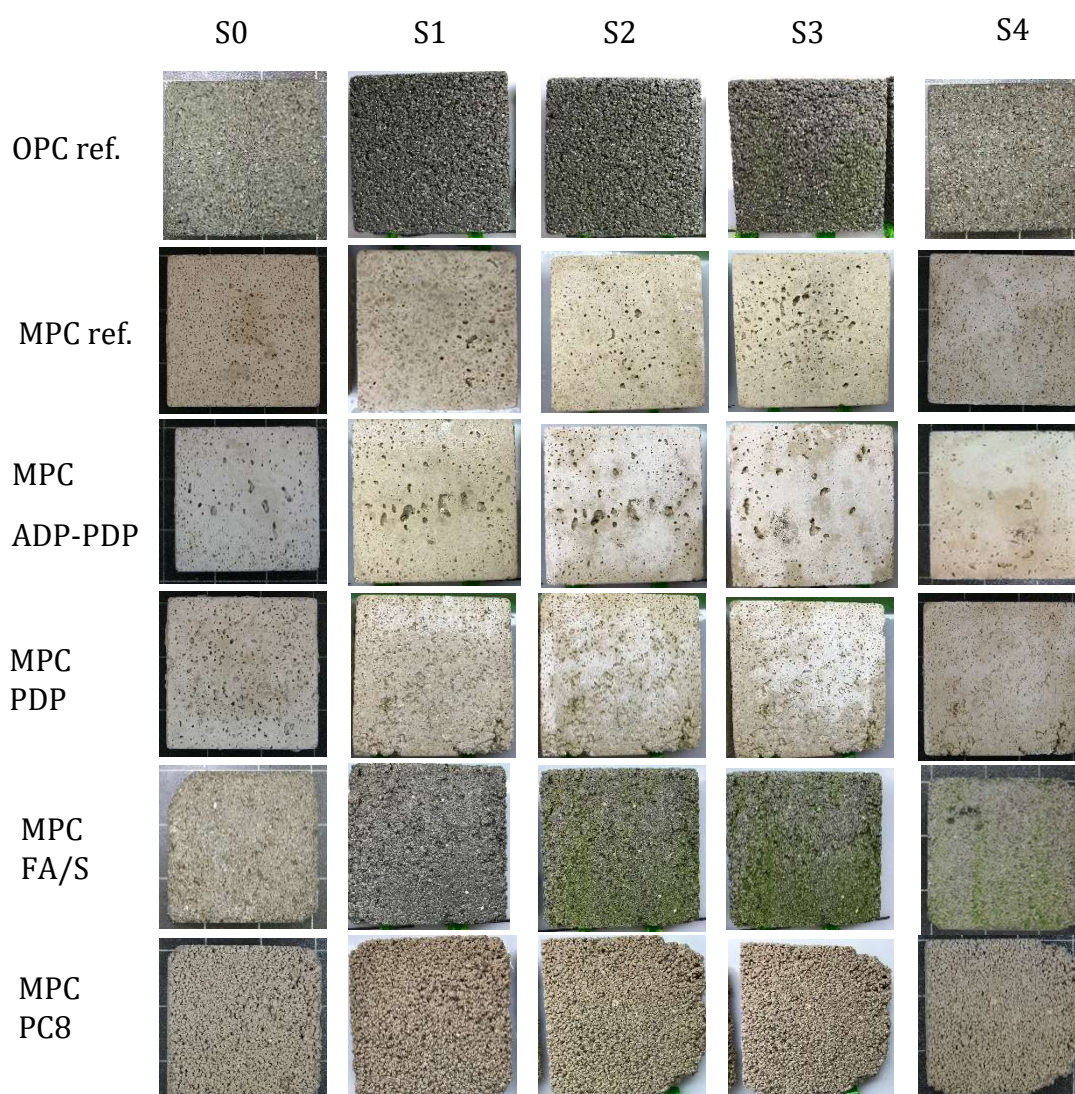
#### 4.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS



#### 4.4.1. Ensayo acelerado de algas

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del ensayo de crecimiento acelerado de algas. La cara expuesta en este ensayo fue la cara que estuvo en contacto con el molde. En la Figura 4.9 se muestra la evolución del crecimiento de las algas a lo largo de las 4 semanas de exposición.

Se puede observar que, entre la primera y la segunda semana, las algas empezaron a colonizar las probetas de FA/S mientras que entre las semanas 2 y 3 empezaron a aparecer en las probetas de OPC. El hecho de que en la foto de la semana 3 se pueda ver mejor que en la foto de la semana 4, es debido a que las fotos tomadas entre semanas de ensayo se realizaban entre ciclos de regado, mientras que la última se ha realizado una vez terminado el ensayo.

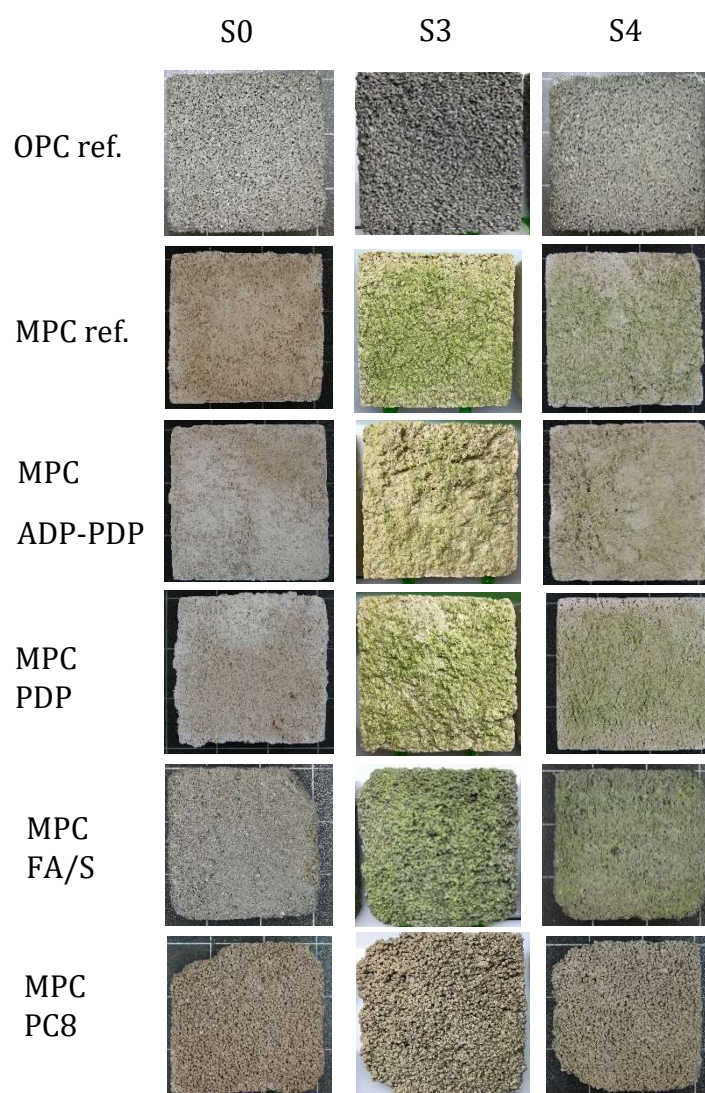


**Figura 4.9. Evolución del crecimiento de las microalgas en la superficie de ensayo a lo largo del ensayo**

Visto que existía crecimiento en las probetas de OPC ref. y MPC FA/S, siendo las de OPC ref. a priori menos biorreceptibles que las de MPC, se examinaron todas las dosificaciones por ambos lados. Se observó que la colonización por parte de las microalgas en las probetas de dosificación MPC ref, MPC ADP-PDP y PDP se daba por la parte del reverso.

Este fenómeno se debe a que, al ser materiales porosos, el agua se filtra hasta llegar a la parte posterior. Una vez llegan al reverso, el hecho de estar en contacto con una superficie dificulta la evacuación del agua y, como además esa parte es más rugosa, es más biorreceptible que el anverso, dándose el crecimiento en el reverso en lugar de en el anverso.

En la Figura 4.10 se observa la superficie contraria a la de exposición, en ella se aprecia crecimiento biológico en las dosificaciones MPC ref. MPC ADP-PDP, PDP y FA/S, las dosificaciones que contienen MgO.



**Figura 4.10. Evolución del crecimiento de las microalgas en la superficie contraria a la de ensayo**

De estos resultados de crecimiento podemos ver que los materiales que han tenido más crecimiento biológico han sido las dosificaciones con contenido de MgO, en especial la dosificación con substitución de parte del MgO por cenizas volantes. También queda patente que el tiempo de aplicación para una cobertura total ha de ser mayor a 4 semanas, dado que con ese tiempo el cubrimiento no es completo.

En este caso, el ensayo se finalizó a las 4 semanas dado que se vio que en la mayoría de las muestras no se daba crecimiento por el lado expuesto, sino por el lado contrario. Dado que, por falta de probetas, no se podía empezar con unas muestras sin colonizar y que, las muestras presentaban suficiente colonización en la cara no expuesta para el ensayo de absorción, se decidió finalizar en ese momento el ensayo.

#### 4.4.2. Ensayo de colorimetría

A continuación, se muestran los resultados de la colorimetría, En la Tabla 4.1 se observan los resultados de los ensayos, en ella se pueden observar varias cosas. En primer lugar, destaca que los resultados en las dosificaciones de ADP-PDP y PDP tienen valores dispares entre las distintas semanas. Al no seguir un patrón de crecimiento o decrecimiento en los datos implica que estos son erróneos.

Esto es debido a que el material presenta manchas de una tonalidad distinta al resto de la superficie, afectando significativamente a los resultados. En el caso del MPC ref., ocurre lo mismo, aunque sin una diferencia tan clara como la de las anteriores.

Dada esta circunstancia, se deben descartar los resultados obtenidos para estas dosificaciones. También destacan la diferencia de valores entre la medición previa exposición a las algas y en la semana 1 en la dosificación de PC8, esto es debido a que el propio color de la probeta se oscureció.

En la Figura 4.11 se muestran gráficamente los resultados de la Tabla 4.2. Se observa que el crecimiento de las muestras de FA/S es superior al del resto. Se puede ver que en la diferencia de color total entre la semana 0 y la semana 2, en la que se aprecia visualmente crecimiento de microalgas, es de 11,58 mientras que entre las semanas 2 - 3 y 3 - 4 la diferencia de crecimiento es de aproximadamente un 10% del valor acumulado en la semana 2.

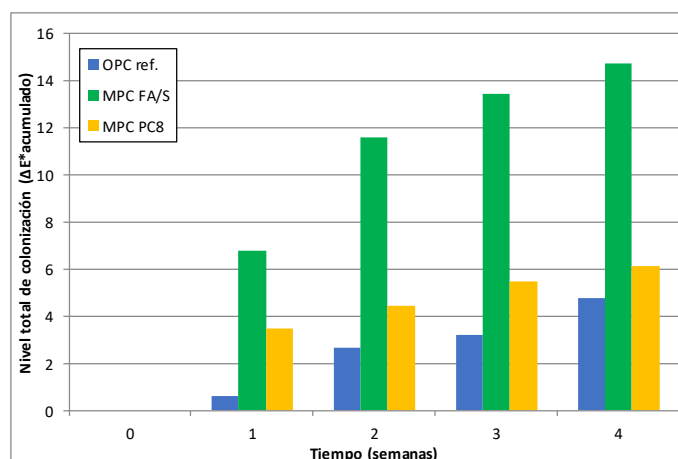
El caso de las probetas de OPC ref. es parecido al de FA/S, visualmente se empieza a observar el crecimiento de microalgas en la semana 2, para esa semana el  $\Delta E^*$  acumulado es de 2,68, un 56 % del  $\Delta E^*$  total. En el caso de la dosificación de PC8, se ha comentado que el color de la probeta al empezar el ensayo se oscureció, por lo que los datos entre la semana 0 y la semana 1 no se pueden tener en cuenta. Teniendo en cuenta esto, el  $\Delta E^*$  total para las muestras de PC8 es de 2,63, valor



parecido al del OPC ref en la semana 2 (2,68), semana en la que no se apreciaba el crecimiento de forma visual.

**Tabla 4.2. Resultados del ensayo de colorimetría**

<b>Muestra</b>	<b>Semana</b>	<b>L*</b>	<b>a*</b>	<b>b*</b>	<b><math>\Delta E^*</math></b>	<b><math>\Delta C^*</math></b>	<b><math>\Delta H^*</math></b>
OPC ref.	0	30,78	-0,01	4,43			
	1	31,34	-0,14	4,24	0,60	-0,18	0,84
	2	29,62	-0,85	5,18	2,08	1,00	2,88
	3	29,30	-1,25	5,19	0,51	0,10	0,61
	4	30,85	-1,06	5,57	1,60	0,33	2,25
MPC ref.	0	72,77	2,32	13,51			
	1	68,98	2,15	14,04	3,83	0,50	5,41
	2	69,12	1,87	13,43	0,69	-0,65	0,96
	3	69,30	1,62	13,89	0,56	0,43	0,73
	4	67,88	1,89	15,33	2,05	1,46	2,89
MPC ADP-PDP	0	74,17	2,40	12,89			
	1	81,38	0,81	8,60	8,53	-4,47	12,03
	2	69,91	2,44	15,44	13,45	6,99	19,01
	3	76,42	0,86	10,14	8,55	-5,46	12,05
	4	67,52	2,68	14,77	10,20	4,83	14,38
MPC PDP	0	81,90	1,15	8,36			
	1	83,81	0,23	6,87	2,59	-1,57	3,58
	2	70,90	1,44	13,76	14,68	6,96	20,75
	3	83,04	0,48	7,67	13,62	-6,15	19,25
	4	70,85	1,62	12,64	13,21	5,06	18,67
MPC FA/S	0	36,73	0,92	6,37			
	1	43,40	-0,01	5,68	6,77	-0,76	9,53
	2	41,75	-1,80	9,83	4,81	4,31	6,66
	3	41,48	-3,42	10,65	1,84	1,20	2,21
	4	40,85	-2,91	9,66	1,29	-1,10	1,81
MPC PC8	0	42,43	3,59	10,27			
	1	45,92	3,32	10,23	3,50	-0,13	4,95
	2	46,65	2,83	10,61	0,95	0,23	1,22
	3	46,00	3,18	9,86	1,04	-0,62	1,37
	4	46,63	3,18	9,95	0,63	0,08	0,89



**Figura 4.11. Gráfica de la evolución del ensayo de colorimetría**

Una vez se observó que el crecimiento biológico en las probetas con dosificaciones MPC ref. MPC ADP-PDP y MPC PDP se daba por la superficie no expuesta, se decidió tomar los datos de colorimetría. En la Tabla 4.3 se muestran los resultados del ensayo de colorimetría para la superficie no expuesta de las probetas de dosificación MPC ref., MPC ADP-PPD, MPC PDP y MPC FA/S.

En esta tabla se puede ver la diferencia entre valores de una superficie no colonizada con una superficie colonizada. Se puede observar que los resultados de la dosificación de MPC FA/S, con colonización en ambas caras, es muy parecida mientras que, en las otras tres dosificaciones, los valores sí que varían.

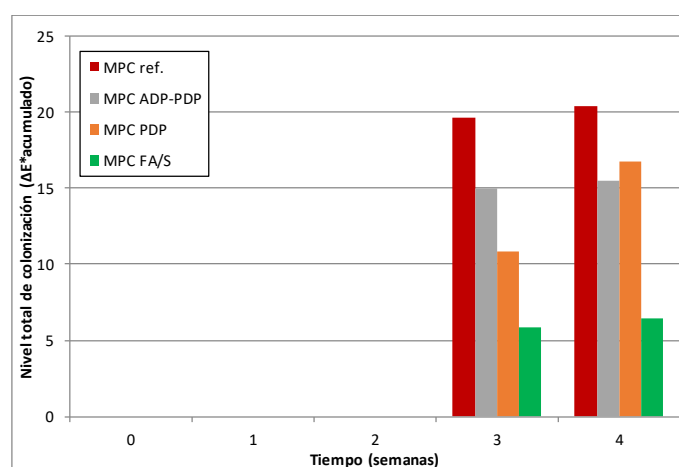
La variación de  $L^*$  se da por los cambios de blanco y negro, al descender en las superficies colonizadas, quiere decir que la superficie colonizada es más oscura. Dado que el color verde de la superficie colonizada es más oscuro que el color beige de las probetas, la diferencia entre los resultados concuerda con los datos obtenidos.

El dato que mejor refleja el crecimiento biológico es el  $a^*$ , se observa que para dosificaciones sin colonizar el valor es positivo (rojo) mientras que en las superficies que sí que han sido colonizadas, el valor pasa a ser negativo, esto concuerda con la teoría y que se muestra en la Figura 4.7.

**Tabla 4.3. Comparación entre resultados de colorimetría en la superficie de exposición y en la de no exposición.**

Muestra	Semana	Superficie de exposición			Superficie de no exposición		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*
MPC ref.	0	72,77	2,32	13,51	72,77	2,32	13,43
	3	69,30	1,62	13,89	54,68	-2,62	19,27
	4	67,88	1,89	15,33	54,12	-2,88	19,70
MPC ADP-PDP	0	74,17	2,40	12,89	74,17	2,41	13,01
	3	76,42	0,86	10,14	60,19	-0,47	17,64
	4	67,52	2,68	14,77	60,63	-0,29	17,56
MPC PDP	0	81,90	1,15	8,36	68,60	2,60	13,85
	3	83,04	0,48	7,67	63,38	-3,96	20,68
	4	70,85	1,62	12,64	57,49	-4,67	21,16
MPC FA/S	0	36,73	0,92	6,37	36,73	0,92	6,37
	3	41,48	-3,42	10,65	39,75	-2,64	9,92
	4	40,85	-2,91	9,66	39,78	-2,43	9,39

En la Figura 4.12 se muestra la representación gráfica de los resultados obtenidos al realizar el  $\Delta E^*$  total de las muestras por la superficie no expuesta. Debido a que los resultados de  $\Delta E^*$  para las probetas de MPC ref., MPC ADP-PDP y MPC PDP en la superficie de exposición no eran concluyentes, aun sirviendo para ver los cambios que se generan en los parámetros, no pueden servir como comparación para la superficie no expuesta.



**Figura 4.12. Gráfica de la evolución del ensayo de colorimetría en la superficie no expuesta**

#### 4.4.3. Análisis de imágenes

En la Tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos mediante el análisis de imagen. En ella se observan los resultados únicamente de las probetas que han tenido colonización, estas han sido las de OPC ref. y las de MPC FA/S. Los datos obtenidos refuerzan los obtenidos por el método de la colorimetría.

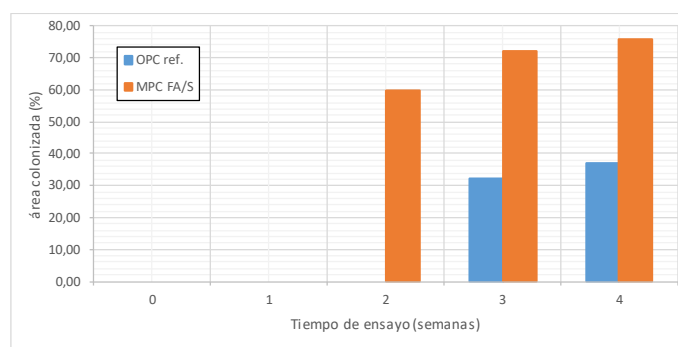
Para las muestras de OPC ref., el área colonizada en la segunda semana era de 0 cm<sup>2</sup>, mientras que en la tercera semana era de 20,48 cm<sup>2</sup>, un 32% del área

total de la muestra mientras que en la cuarta y última semana era de 37,04 cm<sup>2</sup>, un 37,04 % del área total.

En el caso de las muestras de MPC FA/S se observa que en la segunda semana ya se había empezado a colonizar un 59,87 % del área total, aumentando en un 71,93 % y un 75,87 % en las semanas consecutivas. En total se mostraban indicios de colonización en 48,65 cm<sup>2</sup> de los 64 cm<sup>2</sup> del área total de la probeta. En la Figura 4.13 se muestra de forma gráfica la evolución den % del área colonizada en las dos dosificaciones dónde se ha dado el crecimiento de microalgas.

**Tabla 4.4. Resultados análisis de imagen**

Muestra	Semana	A colonizada (cm2)	%	Δ	Δ acumulado
OPC ref.	0	0,00	0,00		0,00
	1	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	20,48	31,99	31,99	31,99
	4	23,71	37,04	5,05	37,04
MPC FA/S	0	0,00	0,00		0,00
	1	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	38,32	59,87	59,87	59,87
	3	46,03	71,93	12,06	71,93
	4	48,56	75,87	3,94	75,87



**Figura 4.13. Evolución del % de área colonizada a lo largo del ensayo**

Como se ha comentado en el apartado 4.4.2 se detectó crecimiento por la parte no expuesta de las probetas. Por ese motivo también se ha realizado el estudio para la superficie no expuesta para las semanas 3 y 4 de ensayo. En la Tabla 4.5 se muestran los resultados obtenidos de realizar el procesado de imagen en la cara no expuesta de las dosificaciones con colonización.

Los resultados de esta tabla indican que las dosificaciones de MPC ref., MPC ADP-PDP y MPC PDP muestran colonización en casi toda la superficie no expuesta al ensayo. También se observa que la muestra de MPC FA/S fue colonizada por el lado de no exposición, siendo así, colonizada en ambas caras.

El hecho de que se muestre crecimiento biológico en la parte no expuesta es debido a que el agua se filtra por las probetas hacia la cara pegada a la bandeja, al

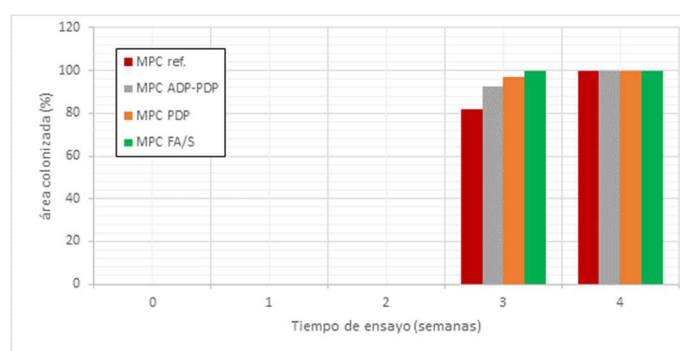
ser una superficie mucho más rugosa que la expuesta, es mucho más biorreceptible. Cabe destacar que este análisis sirve únicamente para conocer el área colonizada no el grado de colonización.

En el caso de las muestras de OPC ref. y de MPC PC8, no se da crecimiento por la superficie no expuesta. Esto es debido a que la superficie de la cara no expuesta no es lo suficientemente más rugosa y, por lo tanto, la biorreceptividad tanto a nivel geométrico como a nivel de material es parecida. El hecho de tener la luz por el lado no expuesto, genera que se de crecimiento por la superficie expuesta.

**Tabla 4.5. Resultados análisis de imagen para la superficie no expuesta**

Muestra	Semana	A colonizada (cm2)	%
MPC ref.	3	52,31	81,74
	4	64,00	100,00
MPC ADP-PDP	3	59,33	92,71
	4	64,00	100,00
MPC PDP	3	61,91	96,73
	4	64,00	100,00
MPC FA/S	3	64,00	100,00
	4	64,00	100,00

En la Figura 4.14 se observa el % de área colonizado en las semanas 3 y 4 en el área no expuesta al ensayo. Se puede observar como era de casi el 100%, mientras que en la superficie de exposición era de n 0%. Este hecho demuestra que la biorreceptividad a nivel geometría influye de una manera notoria en el crecimiento biológico.



**Figura 4.14. Evolución del % de área colonizada a lo largo del ensayo en la superficie no expuesta**



## 4.5. CONCLUSIONES

De estos resultados podemos extraer varias conclusiones. En primer lugar, se ha mostrado que el material usado es igual de importante para el crecimiento biológico que el grado de biorreceptividad geométrica. Se ha visto como en las muestras de MPC las microalgas crecían por la superficie más rugosa, aun no siendo la cara expuesta.

También se ha podido ver como las muestras con contenido de cenizas volantes son más biorreceptibles. En el caso de las muestras con cenizas volantes (FA/S) el crecimiento se ha dado por ambas caras, siendo mayor por la más rugosa. Por otro lado, se ha visto como el PC8, en lo referente a crecimiento biológico, no es tan eficaz como el MgO, siendo incluso más biorreceptible el portland convencional.

El hecho de que el PC8 sea un material menos biorreceptible, indica que podría usarse como material para la inhibición en lugar del crecimiento. El crecimiento de algas en ocasiones se considera una desventaja y un problema, como por ejemplo el crecimiento de algas en canales de transporte de agua. Esta problemática ha dado lugar a diversos estudios sobre desarrollo de materiales inhibidores del crecimiento biológico (Cruz Biel, 2016; Gugat Martí, 2015; Vaquero, 2014).

Por último, se ha podido comprobar que el ensayo de colorimetría no es eficaz para probetas que puedan tener distintos colores, distintas tonalidades o incluso manchas. Al ser un ensayo sensible al color, para superficies que no sean de un color uniforme, el hecho de no medir en un mismo punto exacto puede servir para desechar los resultados.



## CAPÍTULO 5:

### CAMPAÑA DE ABSORCIÓN DE CO<sub>2</sub>

#### 5.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo, se explican los procesos necesarios para poder desarrollar la campaña de absorción de CO<sub>2</sub>. El capítulo se divide en tres bloques, en el primero de ellos, se explica el planteamiento de la campaña experimental de absorción de CO<sub>2</sub>.

En el segundo, se detalla el proceso de programación del sensor y de la subida de datos on-line. También se comenta la metodología de calibración del sensor y de la campaña de absorción. En el último, se muestran los resultados y se hace un análisis de los mismos.

El objetivo principal de este capítulo es explicar con detalle cada uno de los pasos necesarios para poder realizar el ensayo de absorción. Una vez conocidos los resultados de absorción de CO<sub>2</sub>, se podrá determinar si la implantación de esta metodología es interesante y en qué circunstancias lo puede ser.

## 5.2. PLANTEAMIENTO DEL ENSAYO

Este ensayo se plantea con el objetivo de poder cuantificar la posible absorción de gas  $\text{CO}_2$  debido al proceso de fotosíntesis de las microalgas. Para poder realizar el ensayo es necesario el uso de instrumentación que permita medir las variaciones de dicho gas.

Como se ha comentado en el capítulo 2 Estado del arte, se plantea el uso de un sensor MG-811, compatible con los microcontroladores Arduino. El sensor detecta la variación de temperatura que se altera en función de la concentración de gas que haya presente. Estas variaciones en la temperatura se convierten en variaciones de voltaje que, una vez calibrado el sensor, se convierten en valores de concentración de  $\text{CO}_2$ .

Por lo tanto, para poder obtener datos de concentración de gas, es necesario obtener unos valores de referencia conocidos. De esta forma se pueden correlacionar los datos obtenidos del sensor con datos de concentración de gas. Dado que no se tiene un sensor ya calibrado que nos permita calibrar el sensor MG-811, la única forma de tener un valor conocido de gas es partiendo de una concentración conocida.

Para poder generar una concentración de gas conocida se procede de la siguiente forma: se genera el vacío en un recipiente de volumen conocido y, se inyecta una presión de gas conocida. Mediante la expresión de gases ideales, sabiendo la temperatura ambiente, la presión y el volumen, somos capaces de conocer el valor de la concentración de gas.

Dado que se debe medir en un recipiente en condiciones de vacío, es indispensable que el recipiente sea cerrado herméticamente durante el proceso. Normalmente, las mediciones con Arduino se realizan conectando el microprocesador al ordenador y obteniendo los datos directamente. Dadas estas condiciones, se evalúan las posibilidades de introducir el ordenador con que se obtienen los datos dentro del recipiente o conectar el sensor a internet.

La primera de las opciones queda descartada, esto es debido a que los sensores de gas necesitan adquirir cierta temperatura y estabilizarse. El hecho de no poder ver los datos en directo, imposibilita poder detectar el punto en el que el sensor se estabiliza y empieza a dar mediciones fiables.

Visto que la única opción viable consiste en mandar los datos a través de internet, se ha decidido el uso de Arduino Yún. Este modelo de Arduino permite la conexión a internet sin necesidad de añadir otros periféricos como pudiera ser una raspberry. Para la visualización de datos online, la UPC dispone de un servicio llamado smartlab.

Una vez realizado el ensayo con las cantidades conocidas de gas y, mediante la ecuación de gases ideales, obtenemos una recta de calibración. A partir de esta recta de correlación de datos, se plantea el ensayo de absorción de  $\text{CO}_2$ .

Dado que la absorción de CO<sub>2</sub> se realiza por el proceso de fotosíntesis, la muestra debe quedar expuesta a la luz y, ya que se quiere evaluar el descenso, hay que realizarlo en un recipiente hermético. Para tener estas condiciones se ha decidido usar un desecador.

Debido al desconocimiento de la estanqueidad del desecador, se ha considerado necesario el hecho de realizar un ensayo en vacío. Durante el proceso de carbonatación los hormigones generan variaciones de CO<sub>2</sub>, por este motivo, existe la posibilidad de que parte de la variación de CO<sub>2</sub> corresponderá a la que se realice en este proceso.

Por este motivo, se plantea la realización de una medición en vacío de las probetas, de este modo se puede conocer el valor de la absorción que puedan generar sin crecimiento biológico. Una vez corroborada la estanqueidad del desecador y conocido si el hormigón solo absorbe CO<sub>2</sub>, se realizará el ensayo de absorción,

### 5.3. METODOLOGÍA

#### 5.3.1. PROGRAMACIÓN DEL SENSOR

De igual forma que para que una extremidad del cuerpo humano funcione debe recibir la orden del cerebro, para que el sensor funcione debe recibir la orden de un cerebro. Para este ensayo la función de cerebro la realiza el microprocesador Arduino. Para este ensayo, dado que se requiere conexión a internet, se ha escogido Arduino Yún, con una resolución de 10 bytes, es decir, que mide de 0 a 1024 mV, para el caso del sensor, se ha escogido el MG-811, que tiene un rango de medición de 350 hasta 10.000 ppm.

Para conectar el sensor al microprocesador Arduino se han usado cables macho – hembra. La conexión se ha realizado según el esquema mostrado en la Figura 5.1, conectando a 5 V, para la entrada de datos se conecta en el puerto *doubt* del sensor y en el puerto A0 del microprocesador.

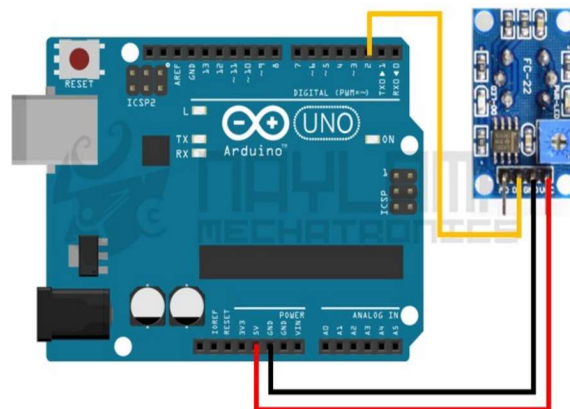


Figura 5.1. Esquema de la conexión del sensor a la placa de Arduino (Naylampmechatronics, n.d.)

Arduino funciona en el entorno Java, por lo que el idioma de programación será Java. La programación del microprocesador se realiza desde el programa propio de Arduino. A continuación, se muestra el código básico usado para la lectura de datos. El código únicamente realiza un proceso de lectura de dato, una vez ha enviado el dato con la fecha y hora, se restaura y realiza otra medición con un desfase de 10 segundos.

```
int CO2=0;

//Setup

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  Serial.println("CLEARDATA");

}

//Loop

void loop() {

  Serial.println(CO2);

  Serial.print("DATA,TIME,");

  CO2 = analogRead(0);

  delay(10000);

}
```

Con esta programación, el sensor envía los datos en microvolteos (mV) al microprocesador y, mediante el mismo programa Arduino o mediante otros como processing o el módulo PLX-DAQ de Excel 2010, se pueden visualizar o almacenar los datos. Como se ha comentado, para el caso de la calibración es necesario el transmitir los datos del microprocesador por internet, por ello, se debe programar el microprocesador y adaptar la programación para el envío de datos.

La programación del microprocesador se hace mediante Python, en él se deben instalar la aplicación del cliente smartlab, este se ha obtenido de <https://smartlab.caminstech.upc.edu/site/home>. Este cliente permite el diálogo entre el microprocesador y la web de almacenamiento de datos de la UPC, pero para el envío de datos, se debe conectar el microprocesador a internet.

Arduino Yún incorpora la función Wireless, de igual forma que un portátil, éste permite conectarse de forma inalámbrica a internet. Para realizar esta conexión se deben seguir los siguientes pasos: en primer lugar, conectar al

ordenador mediante USB, una vez conectado, el microprocesador genera una red local a la que se debe acceder mediante el ordenador (red linino).

Una vez conectados a dicha red linino, se puede acceder al microprocesador mediante la URL <http://192.168.240.1/>. Una vez dentro, el microprocesador pide una contraseña, habitualmente para la configuración de serie la contraseña es *doghunter*. Una vez se ha accedido, se puede configurar la red a la que queremos conectar el microprocesador. Cabe destacar que solo permite la introducción de contraseña, por lo tanto, redes en las que adicionalmente has de introducir un ID, no son válidas.

Una vez se tiene el microprocesador programado y conectado a internet, solo falta introducir la ruta donde se han de enviar los datos en la programación. Para realizar ese paso se debe incluir la librería smartlab en el código e introducir la URL y contraseña del sitio web. A continuación, se muestra el código usado, a diferencia del anterior, en la primera línea de este código se incluye la librería de smartlab. Adicionalmente también muestra el lugar donde se debe colocar la URL, el password y la orden de envío de datos.

```
#include <Smartlab.h>

int CO2=0;

Smartlab smartlab(Serial1);

//Setup
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLEARDATA");
  smartlab.setUrl("URL", "password");
}

//Loop
void loop() {
  Serial.println(CO2);
  Serial.print("DATA,TIME,");
  CO2 = analogRead(0);
  smartlab.addValue("CO2", CO2);
  smartlab.send();
```

```
delay(10000);  
}
```

### 5.3.2. CALIBRACIÓN DEL SENSOR

Como se ha comentado, se requiere poder determinar la correlación entre los valores de voltaje obtenidos del sensor y los de concentración. Para realizar esta correlación se deben realizar mediciones sobre valores conocidos, a partir de ellos, se genera un polinomio que nos permitirá obtener la relación para cualquier valor medido.

Siendo un ensayo sobre absorción de CO<sub>2</sub> y dado que se requieren varios valores conocidos para establecer la calibración, se consideraron dos alternativas. La primera alternativa que se planteó fue calibrar el sensor con otro ya calibrado, dado que no se tenía uno calibrado ni se pudo encontrar uno disponible, se realizó la segunda.

La segunda alternativa considerada fue la de generar una concentración conocida. Para poder llegar a un valor de concentración conocida es necesario empezar haciendo el vacío, dado que, en un inicio, cualquier volumen está lleno de aire. Una vez realizado el vacío se inyecta una presión conocida del gas y, mediante la ecuación de gases ideales (ver ecuación 5.1) se puede calcular la concentración.

$$PV = nRT$$

*Ecuación 5.1*

La calibración se realizó en el laboratorio de materiales de la escuela técnica de edificación de Barcelona de la UPC. El ensayo se realizó en una cámara de carbonatación. En la Figura 5.2 podemos observar la cámara de carbonatación durante la calibración.



**Figura 5.2. Realización de la calibración en la cámara de carbonatación del laboratorio de materiales de la escuela de edificación de la UPC**



La metodología que se siguió para la calibración fue la siguiente: en primer lugar, se midió el volumen de la cámara de carbonatación y la temperatura ambiente. Una vez realizado esto, se puso el sensor con el microprocesador Arduino dentro, dado que no se podía extraer ningún cable, se decidió alimentar eléctricamente el microprocesador y el sensor con una batería externa.

Una vez se tuvo cerrada la cámara, se comprobó el funcionamiento del sensor. Comprobado que el sensor midiera y se recibieran datos a tiempo real online, se empezó con la generación de vacío. Con la cámara en condiciones de vacío se empezó a inyectar CO<sub>2</sub> con escalones de 0,2 bar.

Para cada escalón de presión se esperaba a que el sensor se estabilizara, una vez estabilizado, se tomaban los datos de presión y el valor que se obtenía del sensor. El proceso se realizó para presiones de 0 bar hasta 1 bar con intervalos de 0,2 bar.

### 5.3.3. ESAYO DE ABSORCIÓN

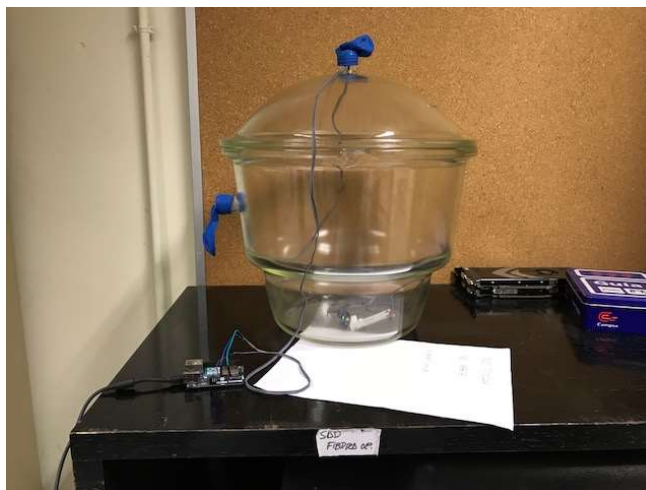
El objetivo principal de este estudio es el de evaluar la absorción de CO<sub>2</sub> que realizan las microalgas que se han hecho crecer en unas probetas. Es por esto que, este ensayo junto con el de crecimiento de las microalgas, son los ensayos principales.

Para este ensayo no existe normativa por este motivo se ha diseñado específicamente para este estudio. La metodología de este ensayo es sencilla, consiste en poner una probeta con colonización de algas en un recipiente transparente hermético con un sensor de CO<sub>2</sub> dentro.

La complejidad de este ensayo reside en los materiales y en cómo desarrollarlo todo en condiciones de estanqueidad más que en el procedimiento. El recipiente usado ha sido un desecador, en la Figura 5.3 se muestra el desecador.

Este desecador tiene dos orificios, dado que cada uno de los ensayos de absorción puede durar horas, se ha considerado que debían estar conectados a la corriente. Por ese motivo se han aprovechados los orificios para hacer pasar los cables del sensor al microprocesador y este, conectarlo a la corriente.

Se pueden observar dos elementos azules, estos son globos. Las boquillas de estos elementos, tienen suficiente elasticidad para adaptarse a los orificios de salida del desecador, incluso con cables, garantizando su estanqueidad. En primera instancia se pensaron métodos más sofisticados para el sellado, fueron descartados por su compleja ejecución y/o por la dificultad que presentaba el removerlos una vez finalizado el ensayo.



**Figura 5.3. Desecador dónde se ha realizado el ensayo de absorción**

El proceso del ensayo consiste en poner las probetas colonizadas dentro del desecador expuestos a luz solar y medir en continuo la concentración de  $\text{CO}_2$ . Dado que las microalgas realizan la fotosíntesis y que el recipiente es estanco, se espera que la concentración de  $\text{CO}_2$  del recipiente disminuya hasta estabilizarse en un valor mínimo.

La campaña experimental de absorción se propuso de 1h 30' una vez calentado el sensor. Aunque para evaluar la absorción hubiera sido mejor un análisis durante 24 h, el hecho de que se escogiera ese intervalo de tiempo fue motivado por las siguientes razones. En primer lugar, tal y como se comenta en el apartado 5.4.2, el sensor tiende a sobrecalentarse, a partir de las 4 h este sobrecalentamiento afecta a las mediciones.

En segundo lugar, se tiene en cuenta que el tiempo de vida de las algas sin aportación de medio de cultivo es de días. Dado que se busca realizar los ensayos para el mismo tiempo de exposición, el tiempo que se tiene para cada uno de los ensayos es corto.

Por último, cabe destacar que, dado que el ensayo se realizó en un lugar con luz natural, la red WI-FI usada para los ensayos en vacío no tenía el suficiente abasto, por ese motivo se conectó directamente al ordenador y se usó el módulo de Excel 2010 PLX-DAQ para la obtención de datos.

## **5.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **5.4.1. CALIBRACIÓN DEL SENSOR**

A continuación, se muestran los resultados de la calibración del sensor. Estos datos son fundamentales dado que servirán para convertir los datos de mV a datos de concentración del gas. En la Tabla 5.1 observamos para cada uno de los valores de presión el valor obtenido en mV y el valor teórico de concentración según la ley de gases ideales.

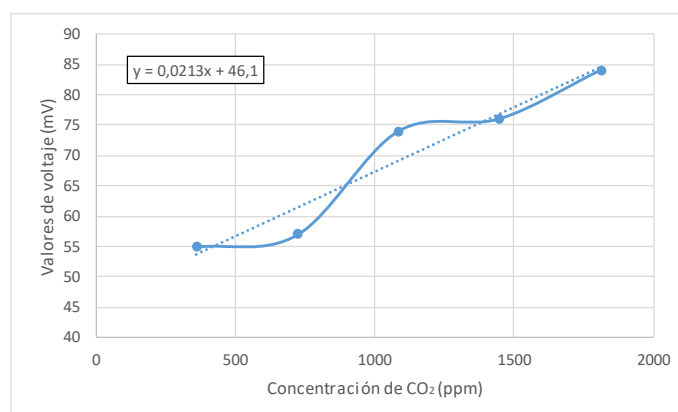
En la Figura 5.4 se muestra la recta de calibración obtenida según los puntos conocidos y la concentración teórica según la ecuación de gases ideales (ver ecuación 5.1). Para determinar la ecuación que servirá para la conversión de datos se ha realizado una regresión lineal tipo logarítmica, dado que es la que se ajusta más a curva de calibrado. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$y = 0,0213x + 46,1 \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Para esta ecuación “y” representa el valor de la concentración en partes por millón (ppm) y “x” es el valor en mV obtenido de la lectura de los datos. Una vez conocida esta ecuación, podemos convertir los datos a la unidad deseada, en este caso ppm.

**Tabla 5.1. Resultados de la calibración**

Presión (bar)	Lectura (mV)	ppm
0,2	55	362,34
0,4	57	724,69
0,6	74	1087,03
0,8	76	1449,38
1	84	1811,72



**Figura 5.4. Recta de calibración del sensor**

#### 5.4.2. CALIBRACIÓN EN VACÍO

Con motivo de asegurar la estanqueidad del desecador para poder analizar correctamente los resultados, se ha realizado una medición del desecador en vacío. De esta forma se pretende asegurar la estanqueidad de dicho desecador y, en caso de no serlo, determinar el valor de la pérdida para poder analizar los resultados de absorción de CO<sub>2</sub> de forma correcta.

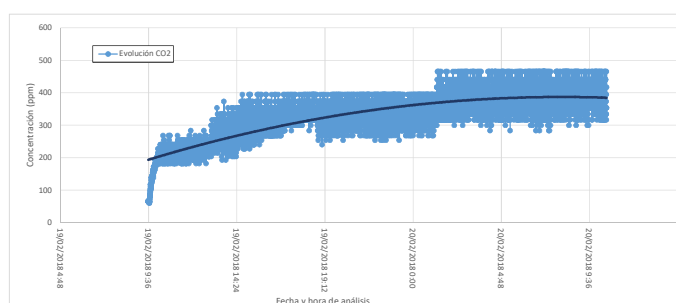
El tiempo de medición se estimó para 24 h, con esta medición inicial se pueden obtener tres datos importantes, conocer el tiempo que necesita el sensor para empezar a tomar datos fiables, dado que previamente debe calentarse.

También sirve para saber si el aumento de temperatura propio del sensor por el uso prolongado en el tiempo afecta en el valor final de las mediciones y, por último, conocer si el desecador es estanco.

En la Figura 5.5 se observa la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> a lo largo de 24 h. En dicha gráfica se puede observar como al principio la medición es mucho menor y sube con una gran pendiente, esto es debido a ese tiempo que el sensor necesita para calentarse y poder tomar datos fiables.

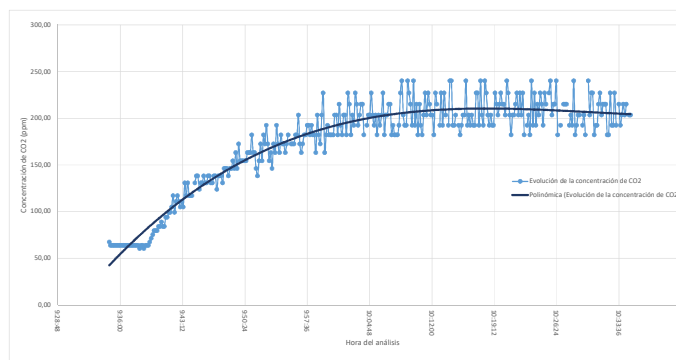
Otro detalle que se aprecia es la dispersión de los datos, esto es debido a la baja resolución del Arduino Yún. Dado que la resolución del Arduino Yún es baja, por cada unidad que varía la medición en micro-volteos (mV) la concentración de CO<sub>2</sub> varía de una forma mayor a una unidad. Este problema se puede resolver con un Arduino de mayor resolución, pero dado que el Arduino Yún es el único que permite una conexión a internet de forma sencilla y dicha conexión era necesaria para la calibración, se ha seguido usando este microprocesador.

Los valores de concentración de CO<sub>2</sub> obtenidos en vacío son de entre 300 y 500 ppm, valores que encontramos habitualmente en zonas exteriores y áreas urbanas (Berenguer et al., n.d.).



**Figura 5.5. Evolución de CO<sub>2</sub> en el desecador en vacío durante 24 h.**

Analizando por horas la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub>, se pueden observar varios detalles. En primer lugar, el tiempo que necesita el sensor para calentarse y dar mediciones correctas o la afectación de la temperatura del sensor en el uso prolongado de este. En la Figura 5.6 se puede observar como durante los primeros 40 minutos los datos que toma el sensor pasan de 60 ppm a valores de 220 ppm en los que se estabiliza. Por tanto, se deduce que el sensor necesita 40 minutos para calentarse y tomar datos correctos.



**Figura 5.6. Evolución de CO<sub>2</sub> en el desecador en vacío durante la primera hora.**

En la Figura 5.5 se puede observar como durante las 4 - 6 primeras horas, una vez el sensor alcanza la temperatura óptima, el sensor mide valores cercanos a los 220 ppm, en las dos horas siguientes, el valor de la concentración empieza a aumentar y va aumentando progresivamente hasta el final.

Dado que el sensor funciona mediante la correlación entre variaciones de temperatura producidas por la concentración de gas y mV, es lógico que el sobrecalentamiento por el uso prolongado del sensor pueda afectar a las mediciones.

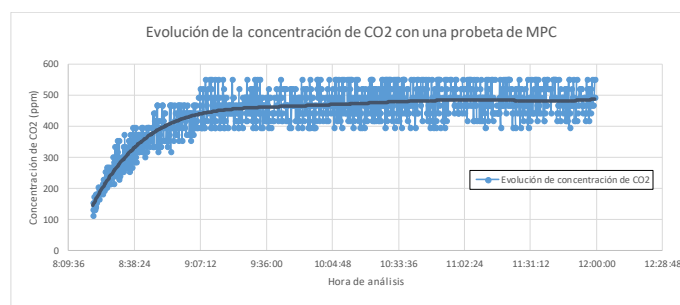
Una vez se ha realizado la primera medición en vacío y se ha visto que a partir de la hora nº 4, la temperatura del sensor afecta a las mediciones. Las mediciones que se realizarán serán de menos 4 horas, teniendo en cuenta que los primeros 40 minutos, sirven para que el sensor llegue a la temperatura óptima. Una vez conocido esto, se realizarán las mediciones con las probetas sin colonización.

#### 5.4.3. CALIBRACIÓN DE LAS MUESTRAS SIN COLONIZACIÓN

Como se ha comentado, debido al proceso de carbonatación los distintos materiales pueden absorber CO<sub>2</sub>. Por ese motivo se ha realizado un ensayo con cada una de las muestras sin estar colonizadas. En la Figura 5.7 se observa la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> en una probeta de las probetas sin colonización.

En dicha gráfica se puede observar el tiempo que el sensor tarda en llegar a la temperatura óptima. También se observa como los valores de la concentración se mueven en un mismo rango de valores, por lo que se deduce que la concentración media de dichos valores (574,92 ppm) es el valor de la concentración existente dentro de la cámara. La variación entre las mediciones puede ser debida a que la temperatura del sensor genere un cambio de densidad local del gas, generando convecciones y un constante movimiento de las partículas de CO<sub>2</sub>, afectando sensiblemente a las mediciones.

Este patrón se repite para todas las muestras, por este motivo únicamente se escoge una de muestra. El hecho de que se mueva dentro de un rango fijo, sin un descenso global de las mediciones, induce a la conclusión de que las muestras no absorben  $\text{CO}_2$  durante los ensayos.



**Figura 5.7. Muestra de ensayo con probeta sin colonizar**

#### 5.4.4. ENSAYO DE ABSORCIÓN DE $\text{CO}_2$

En la Figura 5.8 se muestran los resultados del ensayo de absorción con luz solar para cada una de las dosificaciones. Se puede observar como los valores de concentración obtenidos son de entre 40 y 60 ppm, a excepción del MPC ref., que llega a los 160 ppm. Estos valores están muy por debajo de los valores normales de concentración, que como se ha comentado en el apartado 5.4.2 están entre los 360 y los 500 ppm.

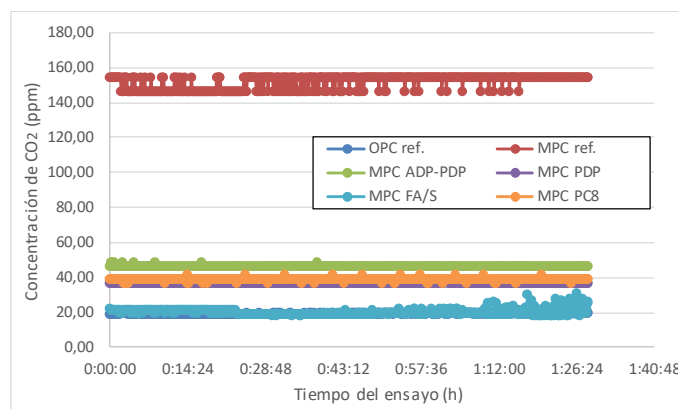
Esto es debido a que el sensor MG-811 tiene un rango de medición de 350 a 10000 ppm. Al realizar la calibración, el valor mínimo de presión que se podía introducir era de 0,2 bar, equivalente a 55 mV y un valor teórico de concentración de 362,34 ppm. Puesto que no fue posible calibrar con exactitud los límites superior e inferior y, teniendo en cuenta el propio error de la recta de calibración, no se pueden cuantificar los valores medidos próximos al límite inferior (0 mV).

Aunque no se pueda realizar un análisis cuantificando los valores reales de concentración, se puede realizar un análisis cualitativo. El hecho de que no se disponga de una recta de calibración lo suficientemente ajustada para determinar la concentración de  $\text{CO}_2$ , no quiere decir que las mediciones realizadas en mV sean erróneas, por lo que igualmente se puede analizar la tendencia.

Hecha esta observación, se puede ver que lejos de absorber  $\text{CO}_2$ , el resultado del ensayo es que durante todo el ensayo la concentración se mantiene constante. Esto puede ser debido por cuatro causas. La primera de ellas es que el planteamiento teórico sea erróneo, dado que las microalgas realizan la fotosíntesis, por ello se descarta que el resultado negativo sea debido a esto.

En segundo lugar, se plantea la posibilidad de que la luz solar durante el ensayo no fuera suficiente. En tercer lugar, se plantea la posibilidad de que las probetas no estuvieran lo suficientemente colonizadas y, por último, se plantea la

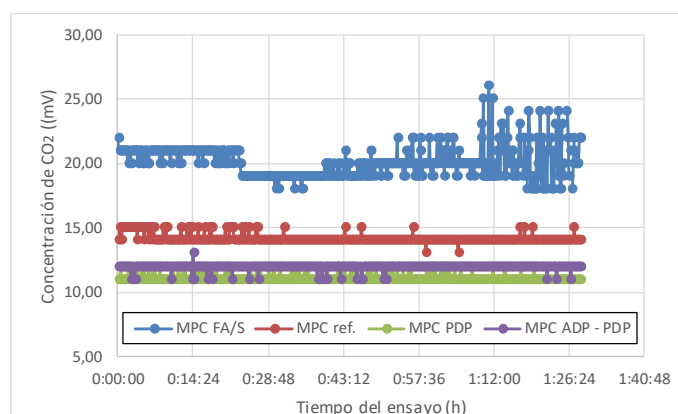
posibilidad de que, al estar fuera de su medio, el rendimiento no sea lo suficientemente alto para notarse.



**Figura 5.8. Gráfico de los resultados de ensayo de absorción**

Dado que se había parado el ensayo de crecimiento acelerado de algas y, que el estudio está pensado para la colonización fuera del agua, el único factor que se puede variar es el de intensidad de luz. Para ello se realizó el mismo ensayo, pero con un fluorescente que simula las longitudes de onda de la luz solar en lugar de luz solar directa. Este segundo ensayo solo se realizó con las muestras que tenían un alto grado de colonización.

En la Figura 5.9 se observan los resultados del ensayo de absorción con luz artificial que simula la luz solar. Dado que los valores obtenidos son del orden de 20 mV, y como se ha comentado, valores tan pequeños no son cuantificables a ppm, se muestran en mV. Se observa que la tendencia de las dosificaciones de MPC ref., MPC PDP y MPC ADP-PDP siguen sin tener variación significativa mientras que, la dosificación de MPC FA/S tiene un comportamiento distinto.



**Figura 5.9. Ensayo de absorción con luz artificial**

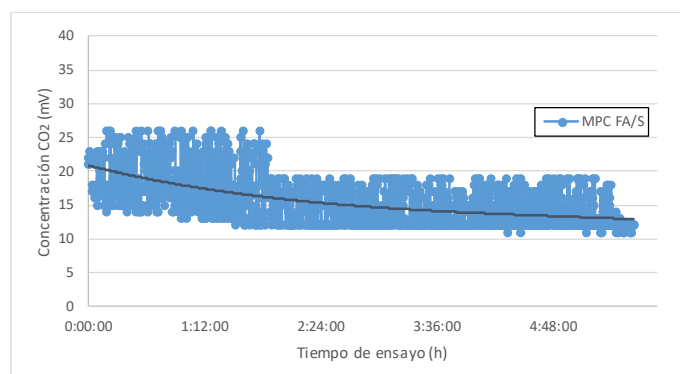
Para la dosificación MPC FA/S, el ensayo empieza con una concentración de entre 20 y 21 mV, estas oscilaciones duran los primeros 23 minutos, una vez pasado este tiempo desciende a 19 mV y se mantiene durante 20 minutos. Pasados 43 minutos de ensayo, la variación de CO<sub>2</sub> empieza a oscilar entre los 18 mV y 26 mV.

Este cambio en la tendencia a disminuir la concentración que tenía en los primeros minutos del ensayo, se puede explicar de la siguiente forma. Las microalgas van absorbiendo  $\text{CO}_2$  y liberando oxígeno, una vez se libera suficiente oxígeno, éste que se halla por debajo y que tiene menos peso que el  $\text{CO}_2$ , desplaza al  $\text{CO}_2$  hacia el fondo, donde se halla la probeta. De esta forma, las partículas de  $\text{CO}_2$  se van acumulando en el fondo produciendo estas variaciones en la concentración.

Esto significaría que, con tiempo suficiente, la concentración de  $\text{CO}_2$  debería dejar de variar para establecerse en un valor. Dado que el volumen del desecador es muy grande, se ha realizado otro ensayo con las probetas de MPC FA/S en un recipiente de 2 L.

En la figura Figura 5.10 se observa que el comportamiento al inicio del ensayo es similar al del final del ensayo con luz artificial. El hecho de que al inicio se den estas variaciones y que al final se estabilice, corrobora la hipótesis anterior. La dosificación de MPC FA/S ha sido colonizada por ambos lados, por lo que tiene una superficie total de colonización de  $112,56 \text{ cm}^2$ , el doble que las demás.

La concentración media durante los primeros 30 minutos del ensayo en mV es de 19,55, mientras que la concentración final, una vez se ha estabilizado, es de 12 mV, esto quiere decir que con un área de  $112,56 \text{ cm}^2$  de microalgas y en 5h y 40 minutos, las microalgas han sido capaces de absorber un parte de la concentración inicial de  $\text{CO}_2$  en 2L de volumen de aire.



**Figura 5.10. Evolución de la concentración de  $\text{CO}_2$  de las probetas de con dosificación MCP FA/S en un volumen de 2L**



## 5.5. CONCLUSIONES

De este capítulo se pueden extraer varias conclusiones. En primer lugar, se pueden concluir distintas cosas acerca del sensor. Para que el sensor MG-811 realice mediciones correctas, debe alcanzar una temperatura adecuada, el tiempo que se ha estimado para ello es de unos 40 minutos.

También se puede concluir que el uso prolongado del sensor afecta a las mediciones realizadas, con lo que se ha estimado que el tiempo máximo de uso constante de unas 4h – 6h. Las mediciones que superen esa horquilla temporal pueden quedar afectadas por el sobrecalentamiento del sensor.

En cuanto a la absorción de CO<sub>2</sub> se pueden extraer varias conclusiones. La primera de ellas es que las algas necesitan cierta cantidad de luz solar para realizar esa función de la forma que se espera, bajas intensidades de luz natural no son suficientes para ver un cambio significativo en los niveles de CO<sub>2</sub>.

También se ha observado que el área colonizada total es importante, se ha visto que, si el área colonizada es poca, no se realiza absorción significativa del gas. También se ha podido ver que el proceso de fotosíntesis y de absorción de CO<sub>2</sub> se puede dar con luz artificial adecuada. Este punto es importante, dado que existen muchas infraestructuras subterráneas en las que se podría aplicar esta metodología.



## **CAPÍTULO 6:**

### **CONCLUSIONES**

#### **6.1. INTRODUCCIÓN**

El objetivo del presente capítulo es exponer las principales conclusiones a las que se ha llegado con este trabajo experimental, por otro lado, hacer una reflexión sobre futuras líneas de investigación que podrían dar continuidad al trabajo. Las conclusiones se presentarán en forma de conclusiones generales y conclusiones específicas.

Las conclusiones generales vendrán dadas por el cumplimiento de los objetivos principales que han determinado y conducido el presente estudio, planteados y comentados en el capítulo 1. Estos, se han dirigido a la caracterización de los materiales usados tanto a resistencia como a biorreceptividad, al crecimiento en las distintas muestras y a la absorción de CO<sub>2</sub> que han generado.

Las conclusiones específicas vendrán dadas por el cumplimiento de los objetivos específicos de los que se habla en el capítulo 1. Estos serán las conclusiones de cuáles son las características mecánicas y geométricas de las

probetas, cuáles son las que han tenido mayor colonización, la determinación de la horquilla en el que el sensor da unas mediciones correctas y, la absorción de CO<sub>2</sub>.

En el último apartado se proponen unas líneas que se deberían seguir para poder seguir evolucionando este método en cuanto a aplicación real, dado que su aplicación actual es muy limitante. También se comentará otro método de crecimiento biológico que, tanto a nivel de aplicación como de mantenimiento, es interesante estudiar.

## 6.2. CONCLUSIONES

### 6.2.1. CONCLUSIONES GENERALES

A lo largo de este estudio se han visto diversos puntos que nos permiten extraer ciertas conclusiones de los temas planteados como generales. En primer lugar, se ha podido observar que, a pesar de tener mayor biorreceptividad en cuanto a geometría, el hecho de estar compuesto por uno u otro material es clave.

Del ensayo de colonización, se concluye que los morteros con MgO son más biorreceptibles que los formados por portland o por PC8. También se ha visto que la inclusión de cenizas volantes favorece a la colonización.

Por último, se puede concluir que para darse absorción de CO<sub>2</sub>, es muy importante tener una luz suficiente (pudiendo ser luz artificial adecuada para ello). Tener un área suficientemente grande y lo suficientemente colonizada es tan importante como el tener suficiente luz.

### 6.2.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Con los datos obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones considerada de carácter específico:

Para la resistencia a compresión, se ha podido ver que, para dosificaciones porosas, el mortero con mayor resistencia mecánica es el OPC ref. mientras que la resistencia de los compuestos por MPC tienen menor resistencia a compresión con tendencia al descenso entre los 7 días y los 28 días.

Se ha determinado que las dosificaciones más rugosas y con más porosidad y que, por lo tanto, son teóricamente más biorreceptibles, han sido las dosificaciones de OPC ref., y MPC PC8, siendo estas dos las que menos colonización han tenido.

Se ha determinado que el área de colonización de las distintas muestras, siendo la dosificación MPC FA/S la más colonizada de todas (por ambos lados) mientras que las de PC8 han resultado no tener colonización.

Se ha comprobado que el sensor MG-811 tarda aproximadamente 40 minutos en llegar a una temperatura óptima para la toma de datos. También se concluye que, en continuo, las mediciones superiores a las 6 h dejan de ser fiables.

Se ha determinado que la afectación de la carbonatación a las mediciones de CO<sub>2</sub> es nula.

Los resultados indican que un área colonizada de 112,56 cm<sup>2</sup> ha absorbido en aproximadamente 6 h, el 56% de la concentración de CO<sub>2</sub> inicial en un volumen de 2L de aire. Para muestras con menor nivel de colonización, no se han podido obtener resultados.

### 6.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una vez finalizado este estudio, existen varias líneas en las que se debe seguir avanzando para poder lograr una implementación en la obra civil. Dado que el ensayo de crecimiento acelerado de algas requiere una infraestructura muy concreta, actualmente solo se podría aplicar en prefabricados o estructuras que cumplieran esos requisitos. Además de las condiciones de geometría, sería necesario disponer de un equipo de regado.

En primer lugar, se debería realizar un estudio en instalaciones reales y monitorizar de forma continua los niveles de CO<sub>2</sub> en la zona de colocación y en las zonas colindantes, pudiendo evaluar la posible mejora de la calidad del aire en un lugar abierto.

También sería adecuado modificar la metodología de implantación para poderse aplicar tanto en estructuras existentes como en estructuras nuevas realizadas in-situ, es decir, que permita el crecimiento en un ángulo recto.

Por último, como alternativa a esta metodología, debe estudiarse también la aplicación de la metodología *moss graffiti*, método usado por artistas para el crecimiento de musgos. La implementación de esta metodología corregiría las carencias que presenta el crecimiento de algas, se puede realizar en cualquier superficie, incluso existente y, el cuidado del musgo es casi inexistente.



## CAPÍTULO 7:

### REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Azcon-Bieto, Joaquín, and Manuel Ona. 2000. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Barcelona.
- Azkorra Larrinaga, Zaloa. 2015. "Estudio Comparativo de Eficiencia Energética: Fachada Ventilada Frente Fachada Vegetal." Universidad del País Vasco.
- Bartfelder, F. y Köhler, M. 1986. *Stadt-Klimatische Und Lufthygienische Entlastungseffekte Durch Kletterpflanzen in Hochbelasteten Innenstadtbezirken*.
- Berenguer, M. J., Licenciada, S., Ciencias, E., Félix, Q., Domínguez, B., & Químico, I. (n.d.). NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior Le dioxide de carbone pour la évaluation de la qualité de l'air interieur Carbon dioxide in evaluating indoor air quality.
- van der Berg, Agnes E., Jolanda Maas, Robert A. Verheij, and Peter P. Groenewegen. 2010. "Green Space as a Buffer between Stressful Life Events and Healthq." *Berkeley Planning Journal* 23(1): 132–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.socscimed.2010.01.002>.
- Buj, Irene et al. 2009. "Effect of Heavy Metals and Water Content on the Strength of Magnesium Phosphate Cements." *Journal of Hazardous Materials* 170(1): 345–50.



- Caminal, Danny. 2017. "El 97% de Los Barceloneses Respiran Más Contaminantes de Los Tolerados." <http://www.elperiodico.com/es/barcelona/20170501/barceloneses-estan-expuestos-particulas-contaminantes-superiores-legales-6008782> (August 15, 2017).
- Carrington, Damian (The Guardian). 2013. "Global Carbon Dioxide in Atmosphere Passes Milestone Level | Environment | The Guardian." <https://www.theguardian.com/environment/2013/may/10/carbon-dioxide-highest-level-greenhouse-gas> (May 6, 2017).
- Cerrillo, Antonio. 2016. "La Polución Mata a 7.000 Personas Al Año En España, Según La OMS." <http://www.lavanguardia.com/natural/actualidad/20160928/41615154185/contaminacion-oms.html> (August 15, 2017).
- Cruz Biel, A. C. (2016). *Evaluación de parámetros que condicionan el crecimiento biológico en canales de hormigón*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Gugat Martí, V. (2015). *Estudio de la eficiencia de tratamientos inhibidores del crecimiento microbiológico para hormigones*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- CYPE Ingenieros, S.A. 2017. "Sistemas de Cubiertas Verdes. Cubiertas. España." [http://www.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/Cubiertas/Sistemas\\_de\\_cubiertas\\_verdes.html](http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Cubiertas/Sistemas_de_cubiertas_verdes.html) (October 18, 2017).
- De Belie, N., Monteny, J., Beeldens, A., Vincke, E., Van Gemert, D., & Verstraete, W. (2004). Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2223–2236. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.015>
- De Ferri, L., Lottici, P. P., Lorenzi, A., Montenero, A., & Salvioli-Mariani, E. (2011). Study of silica nanoparticles – polysiloxane hydrophobic treatments for stone-based monument protection Hydrochemistry of Meteoric and connate water in Western Desert of Iraq View project FUNCTIONALIZED POLYAMIDOAMINES View project Study of silica nanoparticles – polysiloxane hydrophobic treatments for stone-based monument protection. *Article in Journal of Cultural Heritage Journal of Cultural Heritage*, 12, 356–363. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.02.006>
- De Muynck, W., Ramirez, A. M., De Belie, N., & Verstraete, W. (2009). Evaluation of strategies to prevent algal fouling on white architectural and cellular concrete. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 63(6), 679–689. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.04.007>
- Díaz, Carmen. 2016. "PARÍS TOMA DRÁSTICAS MEDIDAS POR CONTAMINACIÓN." <http://enlaescuela.elnortedecastilla.es/2016/grupos/laslol-101/paris-toma-drasticas-medidas-contaminacion-2185.html> (August 15, 2017).
- Española Asociación de Normalización y Certificación (AENOR). (2000). UNE-EN 1015-3. Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of

- consistency of fresh mortar (by flow table), 11.
- Española Asociación de Normalización y Certificación (AENOR). (2005). UNE-EN 196-1.
- Fioretti, R., A. Palla, L. G. Lanza, and P. Principi. 2010. "Green Roof Energy and Water Related Performance in the Mediterranean Climate." *Building and Environment* 45(8): 1890–1904. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.03.001>.
- Fu, Xiaojie et al. 2016. "Preparation and Characteristics of Magnesium Phosphate Cement Based Porous Materials." 127: 712–23.
- Fundació de la Jardineria i el paisatge. 2012. *Normes Tecnològiques d'enjardinaments Especials*. Barcelona: Fundació de la Jardineria i el Paisatge.
- Gardner, L. J., Bernal, S. A., Walling, S. A., Corkhill, C. L., Provis, J. L., & Hyatt, N. C. (2015). Characterisation of magnesium potassium phosphate cements blended with fly ash and ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 74, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.01.015>
- Gedge, Dusty. 2017. "Green Wall Sihl City - Zurich - Dusty Gedge's Roofs & Rambles." <https://dustygedge.co.uk/roadnews/green-wall-sihl-city-zurich/> (October 22, 2017).
- Grimaldos. (n.d.). La cuestión del color. Retrieved May 28, 2018, from <http://www.grimaldos.es/cursos/imgdig/color.html>
- Guillitte, Olivier. 1995. "Bioreceptivity: A New Concept for Building Ecology Studies." *Science, The Agronomiques, Sciences*.
- Herrscher, Roberto, and Rubén P. Becós. 2014. "CaixaForum Madrid: Un Jardín Vertical En La Capital de España." <http://www.b-stylemagazine.com/caixaforum-madrid-un-jardin-vertical-en-la-capital-de-espana/> (October 22, 2017).
- Hou, Dongshuai et al. 2016. "Experimental and Computational Investigation of Magnesium Phosphate Cement Mortar." 112: 331–42.
- Innovativerigging. 2017. "Sihlcity Parking Garage – Zürich, Switzerland | Innovative Rigging." <http://www.innovativerigging.com.au/portfolio-type/sihlcity-parking-garage-zurich-switzerland/> (October 22, 2017).
- Javier Alonso Rodríguez Departamento de Geología, F. U. de O. (2002). Porosimetría por inyección de mercurio, 6. Retrieved from [http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/4888/mod\\_resource/content/1/T3b-PorosimetriaMercurio.pdf](http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/4888/mod_resource/content/1/T3b-PorosimetriaMercurio.pdf)
- Jianming, Yang, and Qian Chunxiang. 2010. "Effect of Borax on Hydration and Hardening Properties of Magnesium and Pottassium Phosphate Cement

- Pastes.” : 613–18.
- Kushner, David. 2011. “The Making of Arduino.” *IEEE Spectrum*. <http://spectrum.ieee.org/geek-life/hands-on/the-making-of-arduino> (July 24, 2017).
- Lian, C., Zhuge, Y., & Beecham, S. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4294–4298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005>
- Liu, Ning, and Bing Chen. 2016. “Experimental Research on Magnesium Phosphate Cements Containing Alumina.” *Construction and Building Materials*.
- Ltifi, Mounir, Achraf Guefrech, and Pierre Mounanga. 2011. “Effects of Sodium Tripolyphosphate Addition on Early-Age Physico- Chemical Properties of Cement Pastes.” *Procedia Engineering* 10: 1457–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.242>.
- Lu, Xuan, and Bing Chen. 2016. “Experimental Study of Magnesium Phosphate Cements Modified by Metakaolin.” *Construction and Building Materials*.
- Ma, Cong, and Bing Chen. 2016. “Properties of Magnesium Phosphate Cement Containing Redispersible Polymer Powder.” 113: 255–63.
- Macauley, Richard. 2015. “China’s Transition.” <http://qz.com/479738/air-pollution-causes-nearly-one-in-five-deaths-in-china-and-over-4000-per-day/> (January 2, 2017).
- Manso Blanco, Sandra. 2014. “Bioreceptivity Optimisation of Concrete Substratum to Stimulate Biological Colonisation.” Universitat Politècnica de Catalunya. [http://www.researchgate.net/profile/Sandra\\_Manso/publication/262938554\\_Bioreceptivity\\_Optimisation\\_of\\_Concrete\\_Substratum\\_to\\_Stimulate\\_Biological\\_Colonisation/links/00b495396b93253979000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Sandra_Manso/publication/262938554_Bioreceptivity_Optimisation_of_Concrete_Substratum_to_Stimulate_Biological_Colonisation/links/00b495396b93253979000000.pdf).
- Martínez, Javier. 2017. “Infolibre: Información Libre e Independiente.” [https://www.infolibre.es/noticias/politica/2017/02/23/el\\_polvo\\_del\\_sahara\\_situa\\_madrid\\_como\\_ciudad\\_mas\\_contaminada\\_del\\_mundo\\_este\\_jueves\\_por\\_particulas\\_suspension\\_61608\\_1012.html](https://www.infolibre.es/noticias/politica/2017/02/23/el_polvo_del_sahara_situa_madrid_como_ciudad_mas_contaminada_del_mundo_este_jueves_por_particulas_suspension_61608_1012.html) (August 15, 2017).
- Mestres, Gemma, and Maria Pau Ginebra. 2011. “Novel Magnesium Phosphate Cements with High Early Strength and Antibacterial Properties.” *Acta Biomaterialia* 7(4): 1853–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actbio.2010.12.008>.
- Minke, Gernot. 1992. *Techos Verdes Planificación Ejecución y Consejos Prácticos*. 3rd ed. Colonia.
- Montalvo Luna, Andrea. 2013. “El Origen Del Fuego.” <http://www.monografias.com/trabajos94/hombre-descubrio-fuego/hombre-descubrio-fuego.shtml> (September 9, 2017).
- Morata, Raul. 2013. “Imágenes Espectaculares.” <http://elmundoespectacular.blogspot.com.es/2011/11/jardines-colgantes-de-babilonia.html> (August 27, 2017).
- Naylampmechatronics. (2010). Tutorial sensores de gas MQ2, MQ3, MQ7 y MQ135.

- Retrieved June 13, 2018, from [https://naylampmechatronics.com/blog/42\\_Tutorial-sensores-de-gas-MQ2-MQ3-MQ7-y-MQ13.html](https://naylampmechatronics.com/blog/42_Tutorial-sensores-de-gas-MQ2-MQ3-MQ7-y-MQ13.html)
- Olalla, Celestino. 2013. "Fundamentos Científicos Del Cambio Climático." Vinculando. <http://vinculando.org/ecologia/fundamentos-cientificos-del-cambio-climatico.html>.
- OMS. 2016. "OMS | Cada Año Mueren 12,6 Millones de Personas a Causa de La Insalubridad Del Medio Ambiente." WHO. <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2016/deaths-attributable-to-unhealthy-environments/es/> (August 15, 2017).
- Ondimu, S. N. (2008). Image processing and roughness analysis as a tool for quantification of physiological well-being in. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 17(1 PART 1), 641–646. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.2189>
- Ottelé, Marc. 2011. Department of Materials and Environment "The Green Building Envelope Vertical Greening."
- Paniagua, Soraya. 2011. "Arduino, La Revolución Silenciosa Del Hardware Libre | SorayaPaniagua  ." <http://www.sorayapaniagua.com/2011/03/14/arduino-la-revolucion-silenciosa-del-hardware-libre/> (October 7, 2017).
- Park, Joon Woo, Ki Hwan Kim, and Ki Yong Ann. 2016. "Fundamental Properties of Magnesium Phosphate Cement Mortar for Rapid Repair of Concrete." 2016.
- Pérez Luque, Gabriel. 2010. "Façanes Vegetades. Estudi Del Seu Potencial Com a Sistema Passiu d'estalvi d'energia, En Clima Mediterrani Continental." Universitat Polit cnica de Catalunya.
- Planelles, Manuel. 2016. "30.000 Muertes Prematuras Al Año En España Por La Contaminación | España | EL PAÍS." [https://politica.elpais.com/politica/2016/11/23/actualidad/1479905871\\_541192.html](https://politica.elpais.com/politica/2016/11/23/actualidad/1479905871_541192.html) (August 15, 2017).
- Prosen, Emil M. 1939. "Refractory Materials for Use in Making Dental Casting." : 1.
- Qiao, Fei, C. K. Chau, and Zongjin Li. 2010. "Property Evaluation of Magnesium Phosphate Cement Mortar as Patch Repair Material." *Construction and Building Materials* 24(5): 695–700. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.039>.
- Raymond A. Cook, K. C. H. (1999). Mercury porosimetry of hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 29, 933–943.
- Rivera de la Rosa, Chanely. 2015. "CUBIERTAS VEGETALES EN LA REGIÓN DEL CARIBE." Universitat Polit cnica de Catalunya.
- Robinette, G O. 1972. *Plants, People, and Environmental Quality: A Study of Plants and Their Environmental Functions*. U.S. Department of the Interior, National Park Service. <https://books.google.es/books?id=d2dYAAAAYAAJ>.
- Shijian, Fan, and Chen Bing. 2014. "Experimental Study of Phosphate Salts

- Influencing Properties of Magnesium Phosphate Cement." *Construction and Building Materials* 65: 480–86.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.021>.
- Soudée, E, and J Péra. 2000. "Mechanism of Setting Reaction in Magnesia-Phosphate Cements." 30: 315–21.
- Teemusk, Alar, and Ülo Mander. 2009. "Greenroof Potential to Reduce Temperature Fluctuations of a Roof Membrane: A Case Study from Estonia." *Building and Environment* 44(3): 643–50.
- Vaquero, J. M. (2014). *Nuevos recubrimientos inhibidores del crecimiento de algas. Aplicación al Canal de Gavet. Comité nacional español de grandes empresas*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Wu, Fan et al. 2008. "Self-Setting Bioactive Calcium – Magnesium Phosphate Cement with High Strength and Degradability for Bone Regeneration." 4: 1873–84.
- Xu, G., Shen, W., Huo, X., Yang, Z., Wang, J., Zhang, W., & Ji, X. (2018). Investigation on the properties of porous concrete as road base material. *Construction and Building Materials*, 158, 141–148.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.151>
- Yang, Q, B Zhu, and X Wu. 2000. "Characteristics and Durability Test of Magnesium Phosphate Cement-Based Material for Rapid Repair of Concrete." 33(May): 229–34.
- Yue, Li, and Chen Bing. 2013. "Factors That Affect the Properties of Magnesium Phosphate Cement." *Construction and Building Materials* 47: 977–83.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.103>.
- Yue, Li, Sun Jia, and Chen Bing. 2014. "Experimental Study of Magnesia and M / P Ratio Influencing Properties of Magnesium Phosphate Cement." *Construction and Building Materials* 65: 177–83.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.136>.
- Zinco. 2015. "Sistemas Zinco Para Cubiertas Verdes." *Guia de Planificación*: 6–26.
- Zuberogoitia, Amaia, and Imanol Agirre. 2011. "Fachadas Arquitectónicas: EDIFICIO CONSORCIO, UN EDIFICIO CON PIEL VERDE." <http://fachadasarquitectonicas.blogspot.com.es/2011/12/edificio-consorcio-un-edificio-con-piel.html> (October 22, 2017).